

FACULTE DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

Année scolaire 1929-1930 — N° 77

---

# L'IONOPHORÈSE DENTAIRE

---

Etude théorique, expérimentale et clinique  
de la pénétration des ions dans les tissus dentaires.

---

## THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

*et soutenue publiquement le 19 Décembre 1929*

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR EN MÉDECINE

PAR

**Pierre-Denis BERNARD**

Diplômé d'hygiène et de microbiologie

Elève de l'Ecole du Service de Santé Militaire

*Né le 12 Février 1904, à Thénac (Charente-Inférieure).*



LYON ET VILLEURBANNE  
ASSOCIATION TYPOGRAPHIQUE

P. PINTAPARIS, Directeur

—  
1929



# L'IONOPHORÈSE DENTAIRE

---

Etude théorique, expérimentale et clinique  
de la pénétration des ions dans les tissus dentaires



Digitized by the Internet Archive  
in 2026

FACULTE DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

Année scolaire 1929-1930 — N° 77

---

# L'IONOPHORESE DENTAIRE

---

Etude théorique, expérimentale et clinique  
de la pénétration des ions dans les tissus dentaires.

---

## THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

*et soutenue publiquement le 19 Décembre 1929*

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR EN MÉDECINE

PAR

**Pierre-Denis BERNARD**

Diplômé d'hygiène et de microbiologie

Elève de l'Ecole du Service de Santé Militaire

*Né le 12 Février 1904, à Thénac (Charente-Inférieure).*



LYON ET VILLEURBANNE  
ASSOCIATION TYPOGRAPHIQUE

P. PINTAPARIS, Directeur

---

1929

# PERSONNEL DE LA FACULTÉ

|                       |                 |
|-----------------------|-----------------|
| Doyen honoraire ..... | M. L. HUGOUNENO |
| Doyen .....           | M. J. LEPINE    |
| Assesseur .....       | M. ROLLET.      |

## PROFESSEURS HONORAIRES

MM. AUGAGNEUR, CAZENEUVE, ROQUE, BARD, LANNOIS

## PROFESSEURS

|                                                      |                 |
|------------------------------------------------------|-----------------|
| Cliniques médicales .....                            | MM. PIC.        |
| Cliniques chirurgicales .....                        | PAVIOT.         |
| Clinique obstétricale et Accouchements.....          | TIXIER          |
| Clinique ophtalmologique .....                       | BÉRARD.         |
| Clinique des maladies cutanées et syphilitiques..... | VORON.          |
| Clinique neurologique et psychiatrique.....          | ROLLET.         |
| Clinique des maladies des enfants.....               | NICOLAS.        |
| Clinique des maladies des femmes.....                | LEPINE (J.).    |
| Clinique d'oto-rhino-laryngologie .....              | MOURICQUAND.    |
| Clinique des maladies des voies urinaires.....       | VILLARD.        |
| Clinique chirurgicale, infantile et orthopédie.....  | COLLET.         |
| Physique biologique, Radiologie et Physiothérapie... | ROCHET.         |
| Chimie biologique et médicale.....                   | NOVE-JOSSERAND  |
| Chimie organique et Toxicologie.....                 | CLUZET.         |
| Matière médicale et Botanique.....                   | HUGOUNENO.      |
| Parasitologie et Histoire naturelle médicale.....    | MOREL.          |
| Anatomie .....                                       | BRETIN.         |
| Histologie .....                                     | GUIART.         |
| Physiologie .....                                    | LATARGET.       |
| Pathologie interne .....                             | POLICARD.       |
| Pathologie et Thérapeutiques générales.....          | DOYON.          |
| Anatomie pathologique .....                          | FROMENT.        |
| Chirurgie opératoire .....                           | CADE.           |
| Médecine expérimentale et comparée et bactériologie. | FAVRE.          |
| Médecine légale .....                                | PATEL.          |
| Hygiène .....                                        | ARLOING (F.).   |
| Thérapeutique .....                                  | ETIENNE MARTIN. |
| Pharmacie .....                                      | COURMONT (P.).  |
| Hydrologie thérapeutique et climatologie.....        | SAVY.           |
|                                                      | LEULIER         |
|                                                      | PIERY.          |

## PROFESSEURS TITULAIRES SANS CHAIRE

|                                              |             |
|----------------------------------------------|-------------|
| Chargé d'un cours de Pathologie externe..... | MM. VALLAS. |
| — — — Propédeutique de gynécologie           | CONDAMIN.   |
| — — — Chimie minérale .....                  | BARRAL.     |
| — — — Urologie .....                         | GAYET.      |

## CHARGÉS DE COURS COMPLÉMENTAIRES

|                                                     |                       |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|
| Anatomie topographique .....                        | MM. THIEVENOT (Léon). |
| Puériculture et hygiène de la première enfance..... | RHENTER.              |
| Chirurgie expérimentale .....                       | TAVERNIER.            |
| Applications du radium... ..                        | NOGIER.               |
| Stomatologie .....                                  | TELLIER.              |

## AGRÉGÉS

|               |                   |             |                  |
|---------------|-------------------|-------------|------------------|
| MM.           | MM.               | MM.         | MM.              |
| GARIN.        | MAZEL.            | CHEVALLIER. | MARTIN (Joseph). |
| TRILLAT.      | SANTY.            | DUMAS.      | ROCHET (Ph.).    |
| SARVONAT      | DUNET.            | DUFOURT.    | WERTHEIMER.      |
| FLORENCE G.). | CHALIER (André)   | DEVIC.      | GATE.            |
| ROCHAIX.      | CHALIER (Joseph). | GABRIELLE.  | BERNHEIM.        |
| RHENTER.      | NOËL.             | MANCEAU.    | DECHAUME.        |
|               |                   |             | POLLOSSON.       |

M. BAYLE, Secrétaire

## EXAMINATEURS DE LA THÈSE

M. CLUZET, Président — M. TELLIER, Assesseur.  
MM. SARVONAT et CHEVALLIER, Agrégés.



La Faculté de Médecine de Lyon déclare que les opinions émises dans les dissertations qui lui sont présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'elle n'entend leur donner ni approbation ni improbation.

A LA MÉMOIRE DE MON FRÈRE.

A MON PÈRE ET A MA MÈRE.

A MA FEMME.

A MES BEAUX PARENTS.

MEIS ET AMICIS.

TO MR WALTER J. HERRINGTON,  
*Principal at Wiliamsville High Normal School*  
*Lecturer in Buffalo University.*

He who has considered me as a brother  
will find here the test of our great friend-  
ship.

A MON MAÎTRE,

M. LE PROFESSEUR V. PACHON,

*Professeur de Physiologie à la Faculté de Médecine  
de Bordeaux.*

*Membre Correspondant de l'Académie de Médecine.*

Il nous a fait le très grand honneur de nous recevoir dans son laboratoire, avec une attention toute paternelle qui nous a profondément touché ; il nous a dirigé vers l'étude des applications de la physique moderne.

Qu'il veuille bien accepter le témoignage de nos sentiments reconnaissants et dévoués.

A MON PRÉSIDENT DE THÈSE,  
M. LE PROFESSEUR CLUZET,  
*Professeur de Physique biologique, Radiologie  
et Physiothérapie à la Faculté de Médecine de Lyon.  
Chevalier de la Légion d'honneur.*

Qui a bien voulu s'intéresser à nos recherches, nous permettre l'accès de son laboratoire et accepter la présidence de notre jury de thèse, nous le prions de trouver ici l'expression de notre respectueuse gratitude.

A MON MAÎTRE,  
M. LE DOCTEUR PONT,  
*Ancien Interne des Hôpitaux,  
Président-Directeur de l'Ecole Dentaire de Lyon.  
Stomatologiste de l'Antiquaille.*

Nous sommes fiers d'avoir été son élève et d'avoir puisé dans son œuvre l'orientation de nos travaux actuels. Nous remercions en lui le guide et le conseiller de tous les instants et lui exprimons nos sentiments les plus reconnaissants.

A MON MAÎTRE,  
M. LE DOCTEUR CHANOS,  
*Chef de Travaux pratiques à la Faculté de Médecine.  
Docteur ès sciences.*

Il a grandement facilité notre travail, et nous a toujours favorisé d'un charmant accueil. Nous l'assurons de notre vive reconnaissance.

A. M. LE DOCTEUR JAMES T. QUINTERO,  
*Président de la Société d'Orthopédie Dento-Faciale,*  
*Professeur à l'Ecole Dentaire de Lyon.*

L'intérêt qu'il a bien voulu porter à nos travaux, l'accueil qu'il nous a toujours réservé ont été pour nous un précieux encouragement. Qu'il veuille bien accepter le témoignage de notre infinie gratitude.

A M. LE DOCTEUR ROMEY,  
*Médecin Commandant, Chef des Services de Stomatologie*  
*et du Centre Maxilo-Facial de la 14<sup>me</sup> Région.*  
*Professeur à l'Ecole Dentaire de Lyon.*

Dans son Service de l'Hôpital Desgenettes, qui nous a été largement ouvert, nous avons réalisé la plus grande partie de nos expériences. En lui nous avons trouvé un chef bienveillant que nous remercions bien respectueusement.

AUX MEMBRES DE MON JURY :

M. LE DOCTEUR TELLIER,  
*Chargé de cours à la Faculté de Médecine de Lyon,  
Stomatologiste des Hôpitaux.*

M. LE DOCTEUR SARVONAT,  
*Professeur Agrégé de Physiologie à la Faculté  
de Médecine de Lyon.*

M. le DOCTEUR CHEVALLIER,  
*Professeur Agrégé de Physique Médicale à la Faculté  
de Médecine de Lyon.*

Nous avons trouvé auprès d'eux l'accueil le plus aimable. Nous les remercions sincèrement d'avoir bien voulu s'intéresser à notre travail et d'avoir accepté de faire partie de notre jury de thèse.

A MES CHEFS DE L'ÉCOLE DU SERVICE DE SANTÉ  
ET DES HÔPITAUX MILITAIRES.

A MES MAÎTRES DES FACULTÉS ET DES HÔPITAUX  
DE BORDEAUX ET DE LYON.

## INTRODUCTION

---

Notre spécialisation en odonto-stomatologie date de l'époque à laquelle M. le Docteur DELGUEL voulut bien nous prendre comme externe provisoire dans son service de l'Hôpital Saint-André, à Bordeaux. Depuis, nous avons poursuivi nos études dans cette voie, à Lyon en particulier, sous la direction de Maîtres éminents qui ont été pour nous prodigues de conseils et d'encouragements.

Nous avons souvent été frappés par l'imperfection des procédés de traitements actuels et par la fréquence des interventions radicales. Après en avoir étudié les causes, nous en avons recherché les remèdes et nous exposons dans notre thèse de doctorat les résultats de nos premiers travaux.

Loin de nous la folle prétention de faire table rase du passé et de vouloir substituer l'ionothérapie à toute autre médication. Nous voulons simplement adapter notre technique aux progrès de la physique moderne.

Nous serons heureux si le fruit de nos recherches peut contribuer, pour une part, à rendre plus rationnelle et plus pratique l'ionothérapie odontologique.

---



« Si nous sommes enserrés par la tradition... rejetons comme une hérésie perniciose... toute théorie moderne... retirons-nous comme des ermites au désert de l'ignorance et refusons toute relation avec le monde pervers et agité de la science moderne. Si, d'autre part, nous croyons que le progrès dans la science n'est pas impossible, ayons foi en notre credo et attribuons au génie de notre temps une autorité ni moindre ni plus grande que celle de notre puissance intellectuelle. »

« NORMAN ROBERT CAMPBELL,  
dans *La Structure de l'Atome*. »

## CHAPITRE PREMIER

---

# LES PROCÉDÉS DE PÉNÉTRATION EN ODONTOLOGIE

---

*Le problème de la pénétration.*

*Les procédés mécaniques.*

*Les procédés chimiques.*

*Les procédés physiques.*

*Les procédés électriques.*

*Terminologie.*

---

Une des grandes questions de la thérapeutique odontologique a pour objet la pénétration médicamenteuse dans les tissus dentaires ; le problème est le suivant :

Une chambre pulpaire est ouverte et communique avec le milieu buccal particulièrement septique, ou bien pré-

sente une imprégnation microbienne d'origine quelconque ; son contenu organique est un excellent milieu de culture : il se trouve à la température de 37°, la plus favorable au développement des microbes saprophytes et pathogènes. L'infection se propage, d'une part le long des canaux radiculaires vers le tissu osseux péri-apical, et d'autre part le long des fins canalicules dentinaires vers le ligament alvéolo-dentaire. Le but du thérapeute sera d'atteindre ces zones infectées pour les soumettre à une action antiseptique quelconque.

En dehors du procédé chirurgical, qui consiste en une résection de la zone infectée, il n'y a qu'une pénétration médicamenteuse par les voies naturelles (canaux et canalicules) qui ait quelque chance de stériliser les foyers infectés.

De nombreuses solutions ont été proposées, qui se ramènent en définitive à l'application de quelques principes mécaniques, chimiques ou physiques ; mais « aucune méthode ne donne à coup sûr de résultats parfaits, disent MM. les Docteurs TELLIER et BEYSSAC, — la preuve en est dans la grande quantité de méthodes employées ».

Par procédé mécanique, nous entendons l'élargissement des canaux dentaires à l'aide de forets, de vrilles qui, entre autres avantages, a celui de produire un véritable curetage de la dentine ramollie et infectée. Cependant ce procédé ne saurait être employé dans les cas si fréquents de racines coudées sans risquer de produire un faux canal ou de briser l'instrument. Il sera malgré tout, dans les cas favorables, le procédé de choix et précèdera souvent l'application des autres techniques.

Par procédé chimique, nous entendons celui qui con-

siste à élargir les canaux en utilisant la propriété érosive d'un acide (acide sulfurique, chlorhydrique) ; qui peut être, soit déposé directement dans le canal, soit produit à l'état naissant par une réaction chimique, comme l'a proposé, en 1928, le Professeur V. A. DOUBROWIN, de l'Institut de Stomatologie et d'Odontologie de Moscou.

L'acide chlorhydrique peut être enfin le résultat de l'électrolyse du NaCl et ce sera là un des principaux effets de la médication électrolytique.

Mais par ces procédés chimiques on ne peut encore atteindre toutes les zones infectées.

Bien plus nombreux sont les procédés physiques qui, d'ailleurs, visent plus directement un but de pénétration.

Ce sont tout d'abord les procédés qui utilisent la pression :

L'injection intra-radicaire est possible lorsque l'orifice du canal est accessible, mais elle produit un réfolement des tissus mortifiés et infectés le long des canaux vers l'apex, et, dans les zones péri-apicales, elle produit une dilacération des tissus.

Plus savant est le procédé qui consiste à placer dans une chambre pulpaire une solution oxygénée à 100 volumes (perhydrol de MERK) et obturer la cavité dentaire. Le dégagement d'oxygène produit une augmentation de pression intra-cavitaire, et refoule vers l'apex tout antiseptique placé préalablement à l'entrée des canaux. Cette technique donne d'excellents résultats dans le cas où, par exemple, une fistule gingivale communique avec le foyer infecté ; mais, si les canaux communiquent avec une cavité close, on risque encore d'avoir un refoulement

de l'infection vers les tissus sains ; enfin la pénétration ne peut être contrôlée.

D'autres procédés utilisent la pression osmotique : le produit est simplement déposé dans la cavité ; mais la diffusion est bien aléatoire et ne peut être mesurée. Nous montrerons que si une diffusion capillaire est fréquente dans les canalicules dentinaires, elle est, par contre, presque inexistante dans les canaux radiculaires remplis de débris organiques.

Une mention toute spéciale doit être faite de l'aldéhyde formique, dont la propriété d'extrême diffusion est justement et universellement appliquée. Malheureusement, cette médication n'est pas encore parfaite : d'une part, pour que la diffusion soit possible il faut que les canaux soient largement ouverts, nullement obstrués par des débris pulpaire ou des copeaux de dentine ; et, d'autre part, si cette diffusion est réalisée, un sérieux inconvénient est dû à l'action irritative du formol sur les tissus sains. C'est ainsi que « la radiographie, dit M. BOSQUET, nous a montré que, après un temps plus ou moins long, les dents dévitalisées présentent des lésions apicales et péri-apicales ». M. le Docteur PONT nous a justement rappelé à ce sujet les travaux de M. RÖHMER ; cet auteur, en effet, a expérimenté sur des dents de singe et a montré l'action néfaste du formol dans les régions apexiennes.

Avec cette médication nous sommes donc dans un dilemme sans issue : ou bien la diffusion est bloquée ou bien il y a action nuisible sur les tissus.

Il existe enfin les procédés dits « électriques » de pénétration médicamenteuse, mais pour la désignation desquels règne une véritable anarchie terminologique. Il

s'agit des expressions : électro-osmose, électrophorèse, cata et anaphorèse, ionisation, ionothérapie, médication ionique, médication électrolytique, électrolyse, introduction électrolytique, électro-stérilisation, électrosmose.

Si l'on s'en rapporte aux vieux auteurs, l'hypothèse d'une électro-pénétration médicamenteuse, à l'aide de machines statiques, avait été émise dès le <sup>xviii</sup><sup>e</sup> siècle ; puis, avec la découverte de la pile, la notion de « courant électrique » a inspiré les expérimentateurs.

PORET, qui avait particulièrement étudié les phénomènes accompagnant le passage du courant, avait remarqué que : si deux électrodes sont placées en deux points quelconques de l'organisme, la région placée sous la cathode devenait œdémateuse, tandis que celle placée sous l'anode se desséchait ; ce phénomène a fait penser à un entraînement en masse des liquides, à un véritable courant électro-osmotique.

L'interprétation de ce phénomène de PORET sera exposée ultérieurement.

Le terme ancien « électrosmose » vient d'être appliqué récemment à un phénomène d'ailleurs encore très hypothétique : les manifestations osmotiques normales des muqueuses seraient multipliées par les coefficient 5 ou 6 par application « unipolaire » de courants alternatifs de haute fréquence. Les promoteurs de l'électrosmose n'ont donné aucune vérification expérimentale et aucune interprétation théorique permettant de déterminer les coefficients indiqués. L'électrosmose a, semble-t-il, donné des résultats cliniques très intéressants entre les mains de M. BARAIL, mais seulement comme adjuvant thérapeutique et par application sur la muqueuse gingivale. Mal-

gré de nombreuses expériences, nous n'avons jamais pu contrôler de pénétration dans les tissus dentaires à l'aide des courants alternatifs de haute fréquence.

Indépendamment du transport des liquides observé par PORET, on avait remarqué le transport électif de substances colorées : le bleu de méthylène est transporté du pôle + vers le pôle — (il s'agit de cataphorèse), l'éosine est transportée du pôle - - vers le pôle + (anaphorèse) et au phénomène général on a donné le nom d'électrophorèse, dit M. le Docteur PONT dans sa thèse consacrée à la « Cataphorèse en Art dentaire ».

Il s'agit, dans ces observations, d'un transport de particules colloïdales dont l'interprétation est intimement liée à l'étude du transport particulier des ions.

### **Terminologie.**

Il n'existe pas, en France, à notre connaissance, de terme pour exprimer le phénomène de migration des ions. De là vient probablement la confusion terminologique.

Les termes : ionisation, ionothérapie, médication ionique, d'une part, et les termes : électrolyse, médication électrolytique, d'autre part, sont l'expression de phénomènes très différents mais à effet commun : l'électro-stérilisation. Mais tandis que les manifestations ioniques sont interpolaires et constituent une pénétration, les manifestations électrolytiques sont, au contraire, surtout polaires et ne donnent que des effets de contact superficiels.

Réserveons au terme « ionisation » l'expression de la réalisation à l'état d'ions de certains milieux ; au terme

« ionothérapie » réservons l'expression de l'effet thérapeutique des ions introduits de façon quelconque.

Nous proposerons alors le terme « ionophorèse » pour désigner le déplacement, la pénétration des ions.

« ion » = *ίόν* participe neutre d'*εἶμι* qui existe ou qui se déplace dans le sens donné par FARADAY.

« phorèse » provient de *φορά* qui veut dire action d'être porté, impulsion, mouvement.

Notre ami le Docteur CRONTIRIS nous a fait remarquer que *ίόν* a pour racine *ίόντ* dont le génitif fait *ίόντον*, il serait donc plus correct de dire « iontophorèse » et même « iontonphorèse », mais dans un but euphonique nous avons préféré le terme « ionophorèse », de même que l'on dit « ionothérapie ».

Un terme semblable existe déjà dans le vocabulaire des auteurs allemands sous la forme « iontophorèse » : En 1913, M. FRANKENHAÜSER a fait un rapport sur « l'état actuel de l'iontophorèse et de la thérapie électrique », où il distingue, avec précision, l'électrolyse de l'ionophorèse, cette dernière étant synonyme de pénétration.

---



## CHAPITRE II

---

### LA NATURE DES IONS

---

- I. — *L'atomistique moderne.*
  - II. — *Structure de l'atome.*
  - III. — *Théories sur les modèles atomiques.*
  - IV. — *Représentation électronique des atomes  
et des ions.*
  - V. — *Les ions dans les cristaux.*
  - VI. — *Le dissociation ionique des électrolytes.*
- 

Les données de la physique moderne nous permettent d'avoir une notion assez précise de la nature des ions et d'en déduire les propriétés. L'intérêt que nous pouvons tirer de ces connaissances n'est pas purement spéculatif, il est aussi pratique. L'interprétation des faits par l'observation des phénomènes physiques nous conduit à une thérapeutique ionique non plus empirique, mais vraiment scientifique : elle nous empêche de faire « comme celui qui secoue sa montre pour la faire marcher », selon l'expression chère au Professeur SAVY.

« Si cette incursion dans le domaine de la science pure,

dit M. LAQUERRIÈRE, dans le *Journal de Radiologie et d'Electrologie* de 1924, paraissait trop spéculative à quelque praticien, il faudrait lui rappeler l'exemple de FABRE-PALAPRAT qui, vers 1833, fut le premier à démontrer que la pénétration médicamenteuse se faisait sous l'influence du courant.... Malheureusement, il finit par mettre le médicament à introduire non pas sur l'électrode, mais dans le liquide même de la pile ; s'il s'était tenu au courant des travaux des physiciens et en particulier de son contemporain FARADAY, il n'eut certainement pas eu cette idée qui nous paraît aujourd'hui grotesque. Se tenir au courant des progrès de la physique est une nécessité pour l'électro-thérapeute. »

#### I. — L'atomistique moderne.

L'étude de la nature et de la constitution des ions nous introduit dans un domaine à la fois philosophique et mathématique : le problème de la constitution de la matière.

La notion des deux infinis de PASCAL était à l'époque une simple vue de l'esprit, c'était le fruit d'une fertile imagination soutenue dans son idéal par des mots. Cependant, une partie de ce que PASCAL imaginait, dans l'infiniment petit, est maintenant du domaine de la connaissance concrète. Au delà du ciron, il y a des microbes ; ceux-ci ont leurs parasites, par exemple l'invisible bactériophage d'HERELLE. Puis on passe presque sans transition brusque au monde colloïdal et de celui-ci au monde moléculaire.

Tout corps est en définitive composé de particules

infinitésimales et identiques que l'on appelle molécules ; celles-ci sont formées d'éléments de corps simples appelés atomes.

La conception de l'atome est déjà ancienne : le mot grec *ἄτομον*, qui signifie indivisible, inséquable, est employé par DÉMOCRITE et EPICURE dans un sens métaphysique. LUCRÈCE compare les atomes aux lettres dont sont formés les mots ; une comparaison ne saurait être plus juste, puisque la variété des molécules est due à une diversité dans le groupement des atomes.

L'atome est la limite de la division de la matière, « l'extrême petitesse de la nature » de PASCAL, où l'on arrive après avoir « épuisé ses forces en conceptions ».

Dans ce « raccourci d'atome », nous allons voir « une infinité d'univers dont chacun a son firmament, ses planètes, sa terre, en la même proportion que le monde visible ».

L'atome n'est plus une représentation approximative ; on en connaît le nombre et les dimensions. Mais ici, l'esprit ne suit plus les chiffres astronomiques que par un psittacisme aveugle ; et, pour en avoir une image concrète, il faut transposer cet infini dans le monde palpable et visible, et regarder l'atome à une échelle qui se mesure par milliards.

« Si on concrétait chaque molécule contenue dans une goutte d'eau par un grain de sable, dit M. Marcel BOLL, la goutte d'eau elle-même correspondrait à un tas de sable qu'on étalerait, par exemple, suivant une couche de vingt centimètres d'épaisseur, la superficie de cette couche de sable serait équivalente à celle de la France » ; et, pour dénombrer les molécules dont l'ensemble forme

cette goutte d'eau, « admettons en outre que nous soyons capables d'en séparer toutes les secondes des tas de un milliard, cette opération de recensement durerait quarante siècles. »

Anatole FRANCE disait : « Ce qui est admirable, ce n'est pas que le champ des étoiles soit si vaste, c'est que l'homme l'ait mesuré ». La notion moderne de la constitution de la matière est également un ensemble admirable de concepts mathématiques. Ainsi, se trouve réalisé le rêve de DESCARTES, qui s'étonnait de ce que les fondements des mathématiques étant « si fermes et si solides, on n'avait encore rien bâti dessus de plus relevé ».

On ne saurait objecter que tout n'est qu'hypothèse à la base de la « science exacte » : Lorsque ces hypothèses aboutissent à des vérifications expérimentales, comme les théories de PLANCK et d'EINSTEIN, il n'est pas permis de douter de la science contemporaine, aussi surprenante soit-elle.

Dans le monde astronomique, la planète Neptune a été découverte, mesurée, étudiée dans sa trajectoire avant même qu'elle ne soit visible au télescope. Dans le monde atomique, nous avons également des manifestations de l'existence des atomes, sans en avoir la preuve par la vision directe. Nous avons, par exemple, dans l'expérience de W. CROOKES, les traces lumineuses des particules  $\alpha$  sur l'écran au sulfure de zinc. Et, dans l'expérience de C. T. R. WILSON, qui a été dénommée : « la plus belle expérience du monde », nous avons la photographie de leurs trajectoires. Enfin, les phénomènes d'interférences et les spectres des rayons de RÖNTGEN nous conduisent à des notions précises sur la structure intime des atomes.

## II. — Structure de l'atome.

« Nous bornant à tenir compte seulement des éléments dont l'existence a été démontrée, nous considérerons l'atome comme constitué par un centre massif chargé positivement et entouré d'électrons » (J. J. THOMSON).

Comparativement aux dimensions totales de l'atome, le noyau central est très petit. Il comprend par contre la presque totalité de la masse (plus des 999/1000).

Sa structure n'est pas connue encore avec précision ; on sait au moins qu'il possède des charges électriques positives et négatives (électrons nucléaires). Les charges positives étant toujours supérieures aux charges négatives, le noyau peut être considéré comme une charge algébriquement positive. On sait en outre que c'est la structure des noyaux qui est intéressée dans les transformations radioactives. ,

L'électron était considéré, en 1891, par G. Johnstone STONEY, comme l'unité naturelle d'électricité négative, sans support matériel, sans masse. On lui reconnaît aujourd'hui une masse relativement très faible :  $8.83 \times 10^{-28}$  grammes, soit environ 1/1845 de celle de l'atome d'hydrogène. La masse de l'électron n'est d'ailleurs pas fixe dans le temps, elle varie lorsqu'il est en mouvement : Lorsque sa vitesse atteint presque celle de la lumière, 297.000 kilomètres à la seconde, « l'électron est sept fois plus lourd qu'au repos..... L'expérience est néanmoins indubitable et en parfaite conformité avec la théorie de la relativité d'EINSTEIN » (Marcel BOLL).

Quant aux dimensions des électrons périphériques, elles sont beaucoup plus grandes que celles du noyau ;

au point que l'on a représenté les électrons par des bulles de savon et le noyau par un grain de plomb.

Quel que soit le nombre de ses charges électriques, un atome est toujours algébriquement neutre. La charge totale des électrons périphériques est égale, en chiffre absolu, à l'excès des charges positives du noyau.

L'atome le plus simple est celui d'hydrogène : son noyau n'a qu'une charge positive (proton) et il ne possède qu'un électron périphérique.

L'atome le plus compliqué est celui de l'Uranium, il possède 92 électrons. On connaît tous les modèles atomiques intermédiaires moins cinq.

Une classification des éléments avait été établie par MENDELEEFF, d'après les poids atomiques croissants. Il s'est trouvé que le numéro d'ordre de ce classement, appelé nombre atomique, correspondait au nombre d'électrons périphériques. La classification de MENDELEEFF est encore appelée : classification périodique des éléments. On retrouve en effet périodiquement des corps simples qui ont des propriétés chimiques analogues : on a ainsi les séries des halogènes, des gaz rares, des métaux alcalins. De même, il y a une répartition régulière des électrons autour du noyau ; et on montre que « de la structure périodique créée par les électrons dépendent les propriétés périodiques physiques et chimiques de l'atome ».

### III. — Théories sur les modèles atomiques.

On entend par modèle atomique la position relative dans l'espace des divers électrons périphériques. Cette disposition est réglée par l'équilibre de forces diverses.

Et, selon que l'on considère uniquement l'action des forces statiques ou l'action combinée de forces statiques et dynamiques, on aboutira à des conceptions différentes, dans les modes de répartition des électrons.

Ainsi, il y a une grande divergence entre la conception de THOMSON et les vues de RUTHERFORD et BOHR. « Ceux-ci admettent que les électrons libres, extérieurs au noyau, tournent autour de lui comme les planètes autour du soleil. Au contraire, J. J. THOMSON admet toujours que ces électrons forment un assemblage en équilibre, sous l'action des seules forces électrostatiques » (A. COTTON).

Cette dernière hypothèse est étrange, à priori. En effet : les deux charges de signes contraires (noyau et électrons) doivent s'attirer et se précipiter l'une sur l'autre, avec une force inversement proportionnelle au carré de la distance.

C'est pourquoi, dans ses conférences faites à l'Institut Franklin, de Philadelphie, sir J. J. THOMSON explique cet équilibre paradoxal en modifiant délibérément la loi de COULOMB. Il pose le postulat :

$$F = \frac{El}{r^2} \left( 1 - \frac{c}{r} \right).$$

Nous avons donc un facteur en  $\frac{1}{r^3}$  et F change de signe pour une valeur de  $r=10^{-8}$  cm. Autrement dit, pour cette valeur de r, l'attraction fait place à une répulsion ; et on a une position d'équilibre. Et, pour avoir dans ce cas un modèle de l'atome, il faut, dit KOSSEL, « chercher à esquisser une configuration de ces charges

électriques telles, que les électrons y figurent dans des positions d'équilibre où ils puissent rester ».

La conclusion est conforme à certaines observations et peut d'ailleurs très bien expliquer les forces de valences et la nature des ions. Mais, puisque « cette théorie est aujourd'hui considérée comme fausse », dit CAMPBELL, nous nous intéresserons plus particulièrement à la théorie de RUTHERFORD-BOHR.

C'est une théorie dynamique de l'atome, calquée sur celle de la gravitation universelle. « Les atomes sont de véritables petits systèmes solaires dont le noyau est l'astre central, les électrons figurant les planètes » (MAX BORN). Les lois de KÉPLER lui sont applicables ; mais elles doivent être complétées par la loi de PLANCK : « Le rapport de l'aire décrite pendant une révolution, au temps mis à la décrire, est un multiple entier de  $\frac{h}{4\pi m}$  (h est la constante de PLANCK).

D'ailleurs, ces deux théories, statique et dynamique, ne sont en opposition que sur la question de la nature des forces qui règlent la distribution des électrons ; et non pas sur la répartition elle-même. Cette répartition a été reconnue expérimentalement par l'étude des spectres des rayons X.

#### IV. — Représentations électroniques des atomes et des ions.

D'après BOHR, chaque électron décrit autour du noyau une orbite individuelle. Il n'y a pas, comme on le dit très souvent, d'orbites communes à plusieurs électrons. Il est en effet d'usage de dire que les électrons se répartissent

# TABLEAU DES ÉLECTRONS PLANÉTAIRES

DES ATOMES ET DES IONS

| Période | DESIGNATION                    |                                                                                           | COUCHES ÉLECTRONIQUES                        |                               |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        | OBSERVATIONS |
|---------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
|         | Z                              | Nombre atomique                                                                           | K                                            | L                             | M                                            | N                                                           | O      |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         |                                |                                                                                           | 1 <sub>1</sub>                               | 2 <sub>1</sub> 2 <sub>2</sub> | 3 <sub>1</sub> 3 <sub>2</sub> 3 <sub>3</sub> | 4 <sub>1</sub> 4 <sub>2</sub> 4 <sub>3</sub> 4 <sub>4</sub> | 5....  |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
| 1       | 1<br>2                         | ion H+<br>particule α++<br>atome H<br>atome He                                            | 0<br>1                                       |                               |                                              |                                                             |        |     | Particule α du radium<br>= noyau d'hélium.<br><br><br><br><br>L'atome C peut perdre<br>ou gagner quatre<br>électrons, ce qui fait<br>que l'on a les ions:<br>C++ ++ et C--- --<br><br>ce qui explique la<br>multiplicité des com-<br>binaisons en chimie<br>organique. |              |
| 2       |                                | ion Li+<br>ion Ge++<br>ion B+++<br>ion C++++                                              | 2                                            |                               |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         | 3                              | atome Li                                                                                  | 2                                            | 1                             |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         | 4                              | atome Gl                                                                                  | 2                                            | 2                             |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         | 5                              | atome B                                                                                   | 2                                            | 2+(1)                         |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         | 6                              | atome C                                                                                   | 2                                            | 4                             |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         | 7                              | atome N                                                                                   | 2                                            | 4+1                           |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         | 8                              | atome O                                                                                   | 2                                            | 4+2                           |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         | 9                              | atome F                                                                                   | 2                                            | 4+3                           |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         |                                | ion C--- --<br>ion N--- --<br>ion O--- --<br>ion F-                                       |                                              |                               |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
| 10      | atome Ne                       | 2                                                                                         | 4+4                                          |                               |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
| 3       | 11<br>12<br>.<br>.<br>16<br>17 | ion Na+<br>ion Mg++<br>ion Al+++<br>atome Na<br>atome Mg<br>.<br>.<br>atome S<br>atome Cl | 2<br>2                                       | 4+4<br>4+4                    | 1<br>2                                       |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         | 18                             | ion S-- --<br>ion Cl--<br>atome A                                                         | 2                                            | 4+4                           | 4+2<br>4+3                                   |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         |                                |                                                                                           | 2                                            | 4+4                           | 4+4                                          |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         | 19<br>20                       | ion K+<br>ion Ca++<br>atome K<br>atome Ca                                                 | 2<br>2                                       | 4+4<br>4+4                    | 4+4<br>4+4                                   | 1<br>2                                                      |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         | 4                              |                                                                                           | ion Cu++<br>ion Zn++<br>atome Cu<br>atome Zn | 2<br>2<br>2<br>2              | 4+4<br>4+4<br>4+4<br>4+4                     | 6+6+5<br>6+6+6<br>6+6+6<br>6+6+6                            | 1<br>2 |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         |                                | 53                                                                                        | atome I                                      | 2                             | 4+4                                          | 6+6+6                                                       | 6+6+6  | 4+3 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                      |              |
| 54      |                                | ion I--<br>atome X                                                                        | 2                                            | 4+4                           | 6+6+6                                        | 6+6+6                                                       | 4+4    |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|         |                                | ion Cs+                                                                                   |                                              |                               |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
| 55      |                                | atome Cs                                                                                  | 2                                            | 4+4                           | 6+6+6                                        | 6+6+6                                                       | 4+4    |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
| 56      |                                |                                                                                           |                                              |                               |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
| 57      |                                |                                                                                           |                                              |                               |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
| 58      |                                |                                                                                           |                                              |                               |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
| 59      |                                |                                                                                           |                                              |                               |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
| 60      |                                |                                                                                           |                                              |                               |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
| 61      |                                |                                                                                           |                                              |                               |                                              |                                                             |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |

Structures atomiques (d'après R.-A. MILLIKAN).



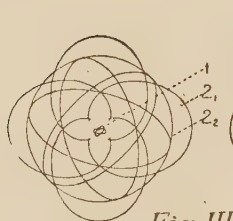
HÉLIUM (2)

*Fig. I*



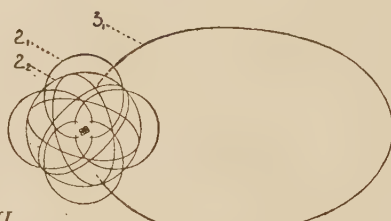
LITHIUM (3)

*Fig. II*



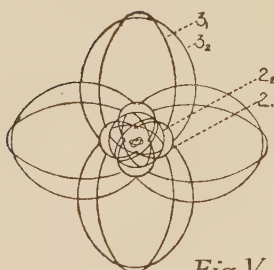
*Fig. III*

NEON (10)



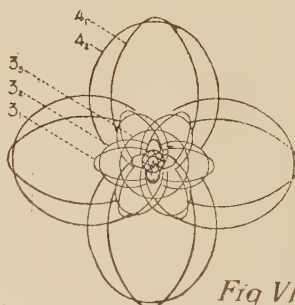
*Fig. IV*

SODIUM (11)



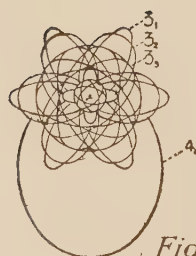
*Fig. V*

ARGON (18)



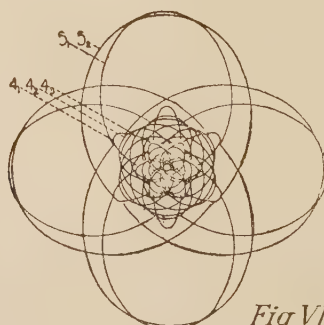
*Fig. VI*

KRYPTON (36)



*Fig. VII*

CUIVRE (29)



*Fig. VIII*

XÉNON (54)

sont sur des anneaux concentriques autour du noyau. Une semblable représentation des atomes est plane et ne correspond pas à la réalité : l'atome a une structure spatiale ; il a au moins trois dimensions. Cette notion existait déjà dans la théorie de J. J. THOMSON.

Plusieurs électrons peuvent avoir même orbite quantique, c'est-à-dire peuvent se trouver à une égale distance du noyau, mais dans des plans différents. Il existe alors des zones ou, comme on dit, des couches concentriques d'orbites électroniques.

La première couche (K), la plus près du noyau, possède au plus 2 orbites ; la deuxième couche (L) en possède au plus 8.

L'atome d'Helium (He) correspond à la saturation de la première couche, il possède deux électrons (fig. I).

Le troisième électron du Lithium (Li) décrit une orbite isolée (fig. II).

Le dixième électron sature la deuxième couche (L) et on a l'atome Néon (Ne) (fig. III). On remarque la symétrie parfaite des orbites individuelles.

Le onzième électron se trouve dans la situation du troisième : il va former la troisième couche (M) ainsi que le représente le schéma de l'ion sodium (fig. IV). Cette troisième couche est complète avec le dix-huitième électron, c'est-à-dire dans le cas de l'argon (fig. V).

Les gaz rares Hélium, néon, argon, Krypton et Xénon n'ont pas d'affinités chimiques, parce que leur couche externe d'électrons est symétrique et saturée.

Les halogènes Fluor, Brome, chlore et iode ont seulement sept électrons dans leur couche externe. Si on donne à un atome halogène un électron supplémentaire, il

à la configuration extérieure du gaz correspondant, et on a ce qu'on appelle un ion.

Ainsi, dans un ion fluor, dont le noyau est composé de neuf charges électriques positives, nous avons dix électrons planétaires négatifs. L'ion Fluor a la même structure que le Néon (fig. III). Mais, tandis que l'atome Ne est électriquement neutre, l'ion Fluor a une charge électrique négative ; on le désigne par le symbole  $F^-$ .

De même, l'ion chlore ressemble à l'Argon, mais il a une charge électrique négative ; l'ion  $Cl^-$  ressemble à l'atome Xénon (fig. VIII).

Les alcalins Li, Na, K, ne possèdent qu'un seul électron dans leur couche la plus externe ; cet électron est lâchement lié à l'atome, et sous certaines influences, il peut s'en séparer. Dès lors la couche la plus externe de l'élément considéré est une couche saturée.

L'ion sodium a la configuration électronique de l'atome Néon et de l'ion  $F^-$ , il n'a que dix charges négatives planétaires, tandis que son noyau possède toujours onze charges positives. Un ion alcalin a donc une charge algébriquement positive, égale en valeur absolue à la charge d'un électron.

Jusque-là, nous n'avons envisagé que les atomes des corps placés, dans la classification de MENDELEEFF, au voisinage immédiat des gaz nobles : ils ne peuvent perdre ou gagner qu'un seul électron. Si nous considérons les atomes bivalents O et S, leur couche électronique externe comprend six orbites d'électrons, ainsi que le montre le tableau de répartition. Cette couche devient complète, si on lui procure deux électrons. Un ion oxygène, un ion soufre, a donc une double charge négative, on les désigne par  $O^{--}$  et  $S^{--}$ .

Les atomes métalliques bivalents Mg, Ca ont dans leur couche la plus externe deux électrons instables et facilement arrachés ; en devenant des ions, les métaux Mg, Ca, perdent deux charges négatives, ils sont doublement électro-positifs :  $Mg^{++}$ ,  $Ca^{++}$ ,

En définitive, un ion conserve la même masse que l'atome qui lui a donné naissance. Mais « les éléments à caractère polaire bien marqué, qui se trouvent dans le voisinage d'un gaz noble, ont toujours à l'état ionisé le même nombre d'électrons que ce gaz ». Un ion est donc chimiquement inactif, « c'est-à-dire qu'il ne montre aucune tendance à changer sa constitution électronique » (KOSSEL)

Une mention spéciale doit être faite du carbone qui a quatre électrons dans sa couche externe : il est à égale distance de l'Hélium et du Néon, il peut donc devenir un ion  $C^{++++}$  ou un ion  $C^{---}$ . Dans le premier cas, il a la configuration de l'Hélium, dans le second cas celle du Néon.

Dans la classification de MENDELEEFF, il existe plusieurs groupes de métaux dont « le changement de propriétés périodiques par addition d'électrons est moindre que partout ailleurs ». Ce sont les éléments dits anormaux. Le principal groupe est celui qui comprend le fer, le cobalt, le nickel, le cuivre. Certains électrons ajoutés vont se placer sur des orbites des couches intérieures de l'atome, et former des couches de plus de huit électrons. Lorsque ces atomes deviennent des ions, ils pourront perdre des électrons centraux en même temps que des électrons périphériques. Le cuivre, par exemple, est bivalent, or il n'a qu'un seul électron périphérique

sur la couche N (fig. VII et tableau). Lorsqu'il se transforme en ion  $\text{Cu}^{++}$ , il perd en même temps son électron de la couche N, et un électron de la couche M.

Une des grandes propriétés caractéristiques de ces éléments anormaux est d'avoir des ions colorés ; cette propriété nous sera d'une grande utilité expérimentale.

A côté des ions simples dérivés d'atomes, que nous venons d'examiner, il y a des ions complexes dérivés de groupements de corps composés :  $\text{So}^{4--}$ ,  $\text{Mno}^{4-}$ ,  $\text{AzH}^{4+}$ . Il nous est beaucoup plus difficile d'en étudier les transformations ; mais il est établi que le passage à l'état d'ions complexes, se fait encore par des modifications électroniques, analogues à celles que nous avons déjà considérées.

La transformation des atomes en ions peut être réalisée dans plusieurs circonstances : dans les rayons canaux, dans l'ionisation des gaz par les corps radioactifs, et surtout, dans les combinaisons chimiques et les phénomènes de dissociation. Des électrons peuvent également être arrachés aux atomes métalliques, dans l'effet thermionique d'Edison et dans l'effet photo-électrique.

#### V. — Les ions dans les composés chimiques cristallins.

Les propriétés chimiques des atomes sont attribuées à la tendance que possède la couche externe d'électrons à devenir complète et stable. D'une manière générale, on peut dire que les forces de valence sont représentées par des forces électrostatiques. « Le phénomène de l'union des atomes, donnés séparément, se déroule en deux

temps, dit M. W. KOSSEL : tout d'abord, l'échange des électrons s'effectue, les atomes se chargent, puis l'union des ions s'accomplit ».

Ainsi, Cl a tendance à prendre un électron, Na a tendance à perdre son électron périphérique : il se formera  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ . « Ca » a tendance à perdre deux électrons qui pourront saturer deux atomes de Cl ; on aura donc :



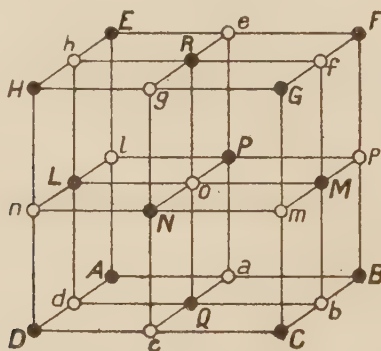
Les corps composés solides sont divisés en deux classes : ils sont amorphes (vitreux) ou cristallins. En réalité, les cristaux seuls sont actuellement considérés comme des solides, alors que les corps vitreux « sont plutôt considérés comme des liquides visqueux ».

La constitution régulière des cristaux a été étudiée par la méthode de von LAUE : la photographie des interférences des rayons de RÖNTGEN ; et l'on connaît maintenant la structure ténue, ou comme on dit « les réseaux » de nombreux cristaux. « Ainsi, dit M. MAX BORN, le chlorure de sodium est formé d'une sorte d'échiquier spatial à trois dimensions, dont les ions de Cl et de Na occupent les sommets ».

La figure ci-après représente la constitution de NaCl : les ions  $\text{Cl}^-$  sont représentés par les points noirs et les lettres majuscules, les ions  $\text{Na}^+$  sont représentés par les points blancs et les lettres minuscules.

Alors que la notion de molécule garde toute sa valeur dans la considération des gaz et des vapeurs, elle perd toute sa signification dans les cristaux : « Aujourd'hui, dit M. N. R. CAMPBELL, nous rejetons la théorie moléculaire appliquée aux composés polaires (avec quelques

exceptions)..., nous savons d'une façon parfaitement certaine, que dans ces corps polaires, qui sont toujours et nécessairement cristallins, il n'y a pas du tout de molécule chimique ».



Structure de NaCl  
Fig. IX (d'après M. BOLL).

Ces considérations sur la structure cristalline vont nous permettre de concevoir d'une façon moderne et nouvelle les phénomènes d'ionisation dans les électrolytes.

#### VI. — La « dissociation ionique » dans les électrolytes.

Lorsqu'un cristal devient liquide, soit par fusion, soit par dissolution dans un solvant quelconque, les ions dont il est formé deviennent mobilisables : ils sont séparés par des espaces tels, que leurs attractions électrostatiques mutuelles sont considérablement diminuées.

Dans une dissolution hydrique, par exemple, les ions sont séparés non plus par des espaces vides, mais par des molécules d'eau. La distribution de ces ions est régie par le principe de BOLTZMANN : elle est fonction du rap-

port de leur énergie potentielle électrique à leur énergie thermique.

On en arrive ainsi à deux notions modernes : la dissociation complète, telle que la conçoivent DEBYE et HÜCKEL, et la notion de dissociation possible dans les solvants autres que l'eau : dans l'alcool, la glycérine...

Autrefois, on admettait que les cristaux étaient une forme de l'état moléculaire et que, sous l'influence de la dispersion par l'eau, certaines molécules se dissociaient en ions (théorie d'ARRHENIUS). Le nombre relatif des molécules ainsi dissociées était d'autant plus grand que la concentration diminuait. Cette dissociation partielle est d'ailleurs encore reconnue exacte pour certaines dissolutions ; en particulier lorsqu'il s'agit de cristaux à réseaux non plus ioniques comme NaCl, mais à réseaux moléculaires comme  $\text{SbCl}_2$  « où les particules élémentaires sont des molécules », dit M. DARMOIS.

M. Stéphane LEDUC avait pensé que certains solvants, tels que l'alcool, le chloroforme, la glycérine ne dissociaient pas les électrolytes, parce qu'ils n'y manifestent presque pas leurs propriétés : « ces solutions ne conduisent pas l'électricité », dit-il ; à l'heure actuelle, ces notions sont considérées comme fausses.

La dissociation complète, qu'il conviendrait peut-être d'appeler « dispersion ionique », est réalisée probablement avec tous les solvants. L'expérience montre d'ailleurs que les électrolytes, à base d'alcool, de glycérine, sont conducteurs. Si les « effets médicamenteux, toxiques, caustiques des substances employées, sont atténués », c'est à un ralentissement dans la diffusion qu'il

faut en attribuer la cause, plutôt qu'à une absence de dissociation comme le pensait M. LEDUC.

La répartition des ions au sein d'un liquide, l'eau par exemple, n'est pas aussi simple qu'on pourrait le croire. En effet : les molécules d'eau  $H^2O$  sont des doublets électriques ( $H^+—OH^-$ ) dont les centres de gravité des charges positives ne coïncident pas avec celui des charges négatives. On aura, comme le dit J. J. THOMSON, « des molécules polarisées », c'est-à-dire qui auront un moment électrique fini et donneront des champs électriques. Ces champs ont une influence sur la répartition des ions, et sur leurs propriétés, comme nous le montrons.

---

## CHAPITRE III

---

# LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES IONS

---

- I. — *Les courants électroniques.*
  - II. — *Les phénomènes d'électrolyse.*
  - III. — *Les courants ioniques (Ionophorèse).*
  - IV. — *Vitesse des ions.*
  - V. — *Les phénomènes de transports secondaires  
(Electrophorèse, Electro-osmose).*
  - VI. — *La pénétration des ions.*
- 

### I. — Les courants électroniques.

Un corps est dit électrisé, lorsqu'il existe une perturbation dans l'équilibre électronique de ses atomes : lorsqu'il y a une perturbation par excès d'électrons, le corps est électrisé négativement ; lorsqu'il y a perturbation par défaut d'électrons, le corps est électrisé positivement.

Envisageons le cas d'un métalloïde : la couche externe de son atome tend à se compléter par addition d'électrons, comme nous l'avons vu, « c'est un piège à électron », a-t-on dit, Toute modification électronique res-

tera localisée au point d'action ; ce corps ne sera pas conducteur de l'électricité.

Au contraire, envisageons le cas d'un métal ; son atome possède un ou plusieurs électrons périphériques lâchement liés et mobilisables : ces électrons peuvent devenir libres et se déplacer dans les espaces inter-atomiques. Un excès d'électrons aura tendance à se répartir d'une manière uniforme, et le métal sera dit : conducteur de l'électricité.

On peut dès lors, avoir une représentation du courant électrique de la façon suivante : entre deux points d'un fil conducteur existe une différence de potentiel, c'est-à-dire une différence dans le nombre relatif d'électrons libres. Le potentiel est en effet le quotient de la charge électrique (nombre d'électrons) par la capacité :  $E = \frac{C}{F}$ . L'équilibre tend à se rétablir et, pour cela, les électrons en excès du pôle négatif « s'écoulent » vers le pôle positif.

Le courant électrique est donc en définitive représenté par un courant d'électrons du pôle négatif vers le pôle positif. Ainsi apparaît une notion paradoxale ; n'est-il pas d'usage, en effet, de dire que le courant électrique va du pôle + vers le pôle — ? Mais il ne faut pas oublier que ce sens est purement conventionnel : il a été établi au temps où l'on avait notion de courant sans avoir notion de sa nature.

Dans l'ampoule de Crooks, le rayon cathodique représente d'une manière parfaite le sens réel du courant électrique : il en possède toutes les propriétés. C'est un cou-

rant d'électrons échappés de la cathode et précipités sur l'anode, avec une vitesse de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres à la seconde.

Du rayon cathodique, nous rapprochons l'effet Edison ou phénomène thermionique dont nous aurons une application dans l'exposé de l'appareillage de l'ionophorèse. Dans une ampoule, est disposé un filament cathodique qui peut être chauffé au rouge par le passage d'un courant ; au voisinage de ce filament est placée une plaque, anode froide, souvent constituée par un cylindre coaxial. Un vide relatif est établi dans l'ampoule. Si une différence de potentiel est appliquée entre les deux électrodes — à condition que le filament soit négatif par rapport à la plaque — un courant d'électrons s'établit du filament vers la plaque.

Il existe deux grandes théories pour expliquer ces phénomènes (courants électroniques) : une théorie dite cynétique des métaux, édiflée par RIECKE, DRUDE, J. J. THOMSON et H. A. LORENTZ, et une théorie thermodynamique émise par H. A. WILSON, complétée par THOMSON et RICHARDSON.

Mais quelle que soit l'hypothèse du mécanisme, « il reste hors de doute, dit M. E. BLOCH, que l'explication de la conductibilité électrique ou thermique des métaux, devra continuer à être recherchée dans un transport d'électrons à l'intérieur du métal ». C'est aussi la conclusion de M. E. DARMOIS : « Dans les métaux, le transport de l'électricité étant effectué par les électrons, le courant circule en sens inverse du sens conventionnel ».

## II — Les manifestations électrolytiques du courant.

Considérons une solution hydrique d'un électrolyte quelconque, NaCl par exemple, dans laquelle plongent deux électrodes de platine reliées à une source de courant continu : On observe des phénomènes connus sous le nom d'électrolyse ; dans le cas particulier de NaCl, nous avons production de soude et dégagement d'hydrogène à la cathode et production d'acide chlorhydrique et d'oxygène à l'anode.

Ces phénomènes ont été étudiés qualitativement et quantitativement par FARADAY ; les lois que ce savant a établies demeurent immuables :

1° Le poids du produit apparu est proportionnel à l'intensité du courant et au temps de passage :  $P = K I t$ .

2° Le poids du produit apparu est proportionnel au poids équivalent  $A/n$  où « A » est le poids atomique et « n » la valence :  $P = K \cdot \frac{A}{n}$ .

« Les lois de FARADAY, dit M. DARMOIS, sont exactes à la façon des lois des proportions définies et multiples de la chimie : les variations de température et de pression leur sont indifférentes. »

L'apparition de matière aux électrodes montre qu'il y a un certain transport dans l'électrolyte. Avant d'en connaître la nature, c'est FARADAY qui a donné le nom d'ions aux particules de matière ainsi transportées.

Une application industrielle de ce transport est réalisée dans la galvanoplastie.

### III. — Les courants ioniques (ionophorèse).

Les faits intermédiaires qui lient le passage du courant aux manifestations électrolytiques, donnent lieu à des interprétations d'un intérêt primordial pour le but que nous poursuivons.

Autrefois, on se contentait de dire : le courant électrique transporte certaines substances. Une semblable conception a eu son époque de vogue. C'était au temps où FABRE-PALAPRAT plaçait le médicament dans le liquide des piles. Les praticiens, méconnaissant les travaux de FARADAY, avaient leur opinion confirmée par le phénomène de PORET, ou transport de liquide dans le « sens du courant ». Ils ne se doutaient pas que ce sens était purement conventionnel et opposé au sens réel.

ARRHÉNIUS introduit la notion de dissociation électrolytique indépendante de tout passage de courant et depuis lors, on a envisagé la migration des ions.

Ce déplacement des ions serait produit, d'après certains auteurs, par le courant électrique. Une semblable interprétation est trop simpliste : c'est faire de ce phénomène de migration une manifestation contingente, secondaire au passage d'un courant électronique à l'intérieur de l'électrolyte.

Aujourd'hui, les conceptions modernes de la constitution des ions et de la nature du courant électrique nous permettent d'avoir une compréhension plus précise des faits.

Considérons une solution de  $\text{NaCl}$ , dans laquelle plongent deux électrodes reliées à une source de courant

continu. L'électrode négative a un excès d'électrons ; l'anode a un déficit.

Les ions négatifs ( $\text{Cl}^-$ ) placés au voisinage de l'anode, sont attirés par elle en vertu même de la loi de COULOMB. Au contact, les ions  $\text{Cl}^-$  cèdent leur électron supplémentaire à l'anode et ils deviennent des atomes neutres. Par contre, les ions  $\text{Na}^+$  sont repoussés par cette anode. Mais à une certaine distance, cette action directe ne se fait plus sentir, car elle est inversement proportionnelle au carré de la distance.

On peut donc considérer une zone péri-anodique, dans laquelle des ions négatifs ont électriquement disparu et où des ions positifs tendent à être en excès relatif.

Du côté de la cathode, des phénomènes semblables se produisent. Les ions  $\text{Na}^+$  sont attirés ; au contact, ils prennent un électron à la cathode et deviennent des atomes neutres. Les ions  $\text{Cl}^-$  sont repoussés, et forment une zone négative péri-cathodique.

Ces zones péri-polaires, où des ions de même signe que l'électrode tendent à être en excès relatif, font penser à une polarisation. Mais cette perturbation n'est que virtuelle ; car « un volume quelconque de l'électrolyte est toujours électriquement neutre », dit M. DARMOIS. L'équilibre se rétablit spontanément par déplacement des ions : les ions positifs en excès se repoussent mutuellement, et sont attirés par les ions de signe contraire de l'électrolyte ; il en est de même pour les ions négatifs pericathodiques.

On imagine ainsi, de proche en proche, une migration des ions positifs de l'anode vers la cathode et une migration des ions négatifs de la cathode vers l'anode. Tout se passe en définitive comme si chaque ion était soumis à

l'action d'une force qui le dirige vers le pôle de signe contraire (fig. X).

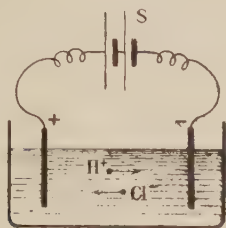


Fig. X (d'après E. DARMOIS).

D'une manière synthétique, on peut schématiquement suivre la marche des électrons dans tout le circuit: « Sous l'influence du champ électrique ( $\text{Cl}^-$ ) apporte son électron à l'anode; cet électron devient un des électrons qui suivent le conducteur métallique; ils traversent la source « S » et vont à la cathode où l'un d'eux rencontre l'ion  $\text{H}^+$ ; il le neutralise et il apparaît de l'hydrogène atomique puis moléculaire. » (E. DARMOIS).

Aussi bien, la conclusion suivante s'impose : dans les électrolytes, il n'y a pas de courant électrique — pris dans le sens habituel de courant électronique — mais un double courant d'ions. La migration des ions, l'ionophorèse, est un phénomène essentiel et non contingent, entendant par là un phénomène nécessaire, qui ne peut pas ne pas se produire.

Toutes les fois qu'un courant électronique se manifeste dans le circuit métallique extérieur, nous avons la certitude d'une migration des ions. Cette ionophorèse tient sous sa dépendance les phénomènes d'électrolyse; elle sera donc proportionnelle à l'intensité du courant et au temps.

Nous noterons, cependant, qu'il est certains cas où les phénomènes électrolytiques et, par suite, les phénomènes ionophorétiques sont quantitativement inférieurs à ce qu'indiquerait le calcul. C'est en général avec les très hauts potentiels ; en particulier dans les cas de courants de H. F. redressés, ainsi que l'ont montré MM. les Professeurs CLUZET et CHEVALIER dans un compte rendu à l'Académie des Sciences du 30 novembre 1925.

Dans ces cas, des électrons doivent passer d'une électrode à l'autre, sans avoir été transportés par les ions de l'électrolyte.

#### IV. — Vitesse des ions.

Il est établi depuis longtemps que la vitesse des ions est proportionnelle au champ électrique. Elle dépend aussi de la température et de la viscosité du milieu. « Pour une solution donnée, dit M. CHANOT, le frottement des ions n'est pas nécessairement le même pour l'anion et le cathion. » Il en résulte que les deux ions d'un électrolyte peuvent avoir des vitesses différentes.

HITTORF a calculé les vitesses des ions en mesurant la « perte de concentration aux électrodes ». On peut également faire des mesures, par l'étude du déplacement des surfaces de séparation de deux électrolytes superposés. Cette surface de séparation est visible lorsque les solutions présentent une différence d'indice de réfraction ; ou bien lorsqu'on a un ion coloré.

Les résultats obtenus sont superposables et les vitesses sont du même ordre de grandeur pour les ions simples : pour l'unité de champ, elle est de quelques microns par seconde.

Il y a une exception cependant pour les ions  $\text{OH}^-$  et  $\text{H}^+$ , dont les vitesses sont respectivement environ cinq et dix fois plus grandes que celles des ions simples.

L'explication de cette anomalie est donnée par plusieurs auteurs de la façon suivante : on admet que dans son mouvement un ion  $\text{OH}^-$ , par exemple, arrive au contact d'une molécule d'eau  $\text{H}^2\text{O}$  ( $\text{H}-\text{OH}$ ); il s'unit avec  $\text{H}^+$  et l'ion  $\text{OH}^-$  de la molécule ainsi libéré continue le mouvement ( $\leftarrow | \text{OH}-\text{H} | \leftarrow \text{OH}^-$ ). « Tout se passe, dit M. DARMOIS, comme si l'ion  $\text{OH}^-$  avait gagné un parcours égal à l'épaisseur d'une molécule d'eau. »

La vitesse considérable de  $\text{H}^+$  est due vraisemblablement à ses dimensions extrêmement réduites, ce qui diminue l'effet de viscosité. En effet : l'atome H ne possède qu'un seul électron périphérique ; l'ion  $\text{H}^+$  est donc formé d'un noyau (proton) sans électron planétaire ; il a donc un diamètre considérablement plus petit que tout autre ion.

La connaissance de ces faits nous empêchera de commettre des fautes, d'ordre pratique, relativement importantes.

L'expression de la vitesse des ions est en général établie en fonction du champ électrique, ou chute de potentiel par unité de longueur :

$$V = K \left( \frac{E}{l} \right).$$

Nous préférons remplacer la notion de champ par celle de densité électrique ; entendant par densité le quotient de l'intensité par la section du lieu de transport :

$$D = K' \frac{I}{S}.$$

En effet, considérons la loi d'Ohm, qui est vraie à condition que le courant soit réparti dans toute la section du conducteur :

$$\text{on a : } I = \frac{E}{R} \text{ et } R = \rho \frac{l}{s}.$$

$$\text{On peut écrire : } I = \frac{E}{\rho \left( \frac{l}{s} \right)}$$

$$\text{et : } \frac{I}{s} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{E}{l} \right).$$

$$\text{Donc densité } D = \rho \frac{I}{s} = \frac{E}{l} = \text{champ.}$$

Nous préférons la notion de champ parce que, dans la pratique, il nous est plus facile de mesurer directement une intensité qu'une différence de potentiel.

La vitesse est donc proportionnelle à la densité :

$$V = K' \frac{I}{s}.$$

On conçoit d'ailleurs aisément que la vitesse des ions soit d'autant plus grande que le passage est plus étroit, si l'on se rapporte aux données comparables de l'hydrodynamique.

Dans des tubes de section d'un centimètre carré, les vitesses sont de l'ordre du centimètre à l'heure. Dans des sections tubulaires moins grandes (et c'est le cas des canaux dentaires) nous avons obtenu des vitesses beaucoup plus grandes : de l'ordre de plusieurs millimètres à la minute avec des intensités de quelques milliampères.

Cette loi n'est d'ailleurs pas absolue et, lorsqu'on fait circuler des ions dans un tube capillaire, on obtient un entraînement de l'eau « produit par le voyage des ions

de la couche double au contact de la paroi... d'où une résistance supplémentaire ». (E. DARMOIS).

## V. — Les phénomènes de transports secondaires.

### *L'électro-osmose.*

Cette particularité des tubes capillaires, que nous venons de citer, est applicable aux traversées des membranes et des milieux spongieux. Cet entraînement de liquide doit expliquer en partie le phénomène d'électro-osmose de PORET. Mais ce phénomène est également lié au fait de notion assez récente : l'hydratation des ions.

Dans l'étude de la constitution des électrolytes nous avons vu qu'une molécule du solvant  $H^2O$ , par exemple, était algébriquement neutre mais pouvait être considérée comme un doublet électrique où le centre de gravité des charges + ne coïncide pas avec celui des charges — ; un ion  $Na^+$  qui se comporte comme une charge + crée un champ électrique et « orientera vers lui les charges — de la molécule d'eau : il pourra même y avoir fixation, on dit alors que les ions sont hydratés ». (E. DARMOIS).

L'hydratation des ions avait été étudiée en 1909 par P. DUTOIT et G. BAUME. WASHBURN l'a vérifiée, en mélangeant à l'électrolyte  $NaCl$  un corps non ionisable, du sucre par exemple. On constate que la concentration du sucre n'est pas la même aux deux électrodes après le passage du courant. On peut ainsi mesurer la quantité d'eau transportée et apprécier la différence d'hydratation des ions.

En général, les ions  $Na^+$  sont plus hydratés que les

ions  $\text{Cl}^-$ ; c'est pourquoi le transport des ions  $\text{Na}^+$  au voisinage de l'électrode négative « tient sous sa dépendance l'hydratation des tissus ». (ZIMMERN).

De même les pathogénistes modernes attribuent à l'ion  $\text{Na}^+$  le rôle principal dans l'étiologie des œdèmes.

### *L'électrophorèse.*

L'étude des colloïdes nous apprend que les ions peuvent se fixer sur les micelles et créer ainsi autour des corpuscules colloïdaux une véritable couche électrique. « La présence de charges électriques sur les granules d'une suspension est considérée comme la cause la plus tangible de sa stabilité. » (P. BARY).

Du fait de l'adsorption privilégiée à la surface des micelles de certains ions de la solution, il résulte que l'on peut avoir un transport colloïdal, sous l'influence d'un courant électrique, soit dans un sens, soit dans l'autre ; ce sens étant déterminé par la nature des ions périmicellaires.

On observe ce transport dans l'expérience suivante :

Dans un tube en U (fig. XI), on place une suspension colloïdale et au-dessus des niveaux M et N on verse de l'eau légèrement salée. Si on applique une différence de potentiel aux électrodes E, on constate que le niveau s'est élevé dans une branche et abaissé dans l'autre.

On peut également suivre le déplacement au microscope. Ce mouvement est rectiligne et à sens constant, donc différent de l'agitation brownienne.

« C'est le phénomène connu sous le nom d'électrophorèse. » (P. BARY).

L'électrophorèse d'une solution de bleu de méthylène se fait vers le pôle négatif ; c'est un cas de cataphorèse. Avec une solution d'éosine, on a une anaphorèse.

L'électrophorèse et l'électro-osmose sont donc des phénomènes soumis à des lois complexes, mais toujours sous la dépendance de la migration des ions.

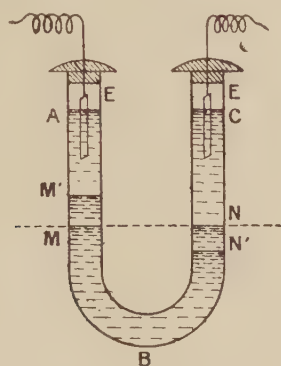


Fig. XI (d'après BARY).

Il est dès lors difficile d'imaginer une osmose électrique par les courants de H. F. Comme nous l'avons aimablement fait remarquer M. DARMOIS : « La conductibilité en H. F. consiste en un balancement des ions autour de leur position d'équilibre, le déplacement étant nul ; on ne peut donc pas faire entrer les ions dans l'organisme par ce procédé. »

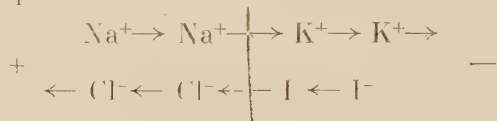
## VI. — La pénétration des ions.

Jusqu'ici nous n'avons envisagé l'étude de l'ionophorèse que dans des solutions continues et homogènes d'ions ; il est intéressant de savoir ce qui se passe lorsque l'on a des « chaînes d'électrolytes » — c'est d'ailleurs le cas des applications thérapeutiques, lorsque nous vou-

lons faire pénétrer les ions d'une solution médicamenteuse dans l'autre solution électrolytique que constitue notre organisme.

Nous avons été initiés à la complexité des « phénomènes provoqués par le passage du courant continu à travers le contact de deux dissolutions aqueuses d'électrolytes », par notre Maître M. CHANOT. L'étude détaillée devrait constituer un chapitre entier.

Nous allons considérer d'abord les phénomènes d'une façon simpliste :



Soit une solution de KI au contact d'une solution NaCl (notre organisme, par exemple). En donnant une polarité négative à la solution KI et une polarité positive à NaCl de l'organisme, nous observons au contact des deux liquides un double échange : la solution positive NaCl reçoit des ions négatifs  $\text{I}^-$  de la solution négative KI qui, elle-même, reçoit des ions positifs  $\text{Na}^+$  de la solution positive.

« Une pareille conception est par trop schématique » ; en effet, il y a lieu de tenir compte : 1° de modifications survenant au contact des liquides ; 2° du rôle de la membrane qui peut séparer ces deux liquides ; 3° du rôle des tissus vivants.

De la très intéressante étude de M. CHANOT, nous devons retenir que : les phénomènes, survenus dans la zone de contact, ne sont pas dus à une polarisation électrique — ce terme étant pris dans son sens habituel. Ils résultent de modifications chimiques possibles dans le

cas d'électrolytes à ions différents ; et surtout de modifications de concentration au niveau des contacts liquides, lorsqu'il y a un ion commun dans les deux électrolytes. Ces phénomènes de concentration vont en croissant avec la durée d'application du courant ; et, lorsque le courant est interrompu, l'équilibre se rétablit par diffusion simple.

Dans la pratique nous aurons surtout à considérer ces effets de concentration car nous aurons toujours un ion commun, soit  $\text{Cl}^-$  soit  $\text{Na}^+$ , ou un ion à propriétés semblables :  $\text{K}^+$ .

Le rôle des membranes ne nous est pas encore connu de façon parfaite ; en attendant les précisions que nous donnera l'avenir, nous n'en retiendrons que la notion grossière d'obstacle à la pénétration.

Cet effet de membrane est probablement cause des insuccès, lorsque l'on veut faire pénétrer de gros ions complexes à travers la peau : « Divers ions, la cocaïne par exemple, paraissent pour une bonne part se loger dans l'épiderme, qui ultérieurement s'exfolie. » (DELHERM et LAQUERRIÈRE).

Du rôle des tissus vivants nous ne retiendrons pour le moment que l'effet suivant : le réseau vasculaire sous-épidermique est extrêmement serré, et il y a un entraînement des ions par le torrent circulatoire. Aussi bien, « quelles que soient les modifications apportées à leurs expériences, les auteurs croient que les médicaments sont surtout demeurés dans la peau..., jamais ils n'ont pu les rencontrer dans la profondeur des tissus, pas même dans le tissu cellulaire sous-cutané ». (DELHERM et LAQUERRIÈRE).

Tout autre est le problème de la pénétration des ions dans les canaux dentaires : 1° Nous n'avons pas de membrane à traverser ; tout au plus avons-nous un tissu spongieux dont les lacunes sont assez grandes, même dans le cas de débris pulpaire ou dentinaires pour considérer l'obstacle comme pratiquement négligeable ; 2° Nous n'avons pas de drainage vasculaire : les filets radiculaires sont mortifiés.

A cela il convient d'ajouter que la pénétration transcutanée des ions se fait à une vitesse extrêmement faible. la densité du courant est de l'ordre du demi-milliampère par centimètre carré au maximum. La vitesse est considérablement plus grande dans les canaux dentaires ; on peut atteindre, en effet, l'intensité de 3 milliampères pour une section inférieure à 1 millimètre carré, ce qui donne une densité et une vitesse six cents fois plus grandes.

\*  
\* \*

Il résulte, de l'étude de ces propriétés ioniques, que l'on peut espérer obtenir une pénétration intéressante des ions dans les tissus dentaires.

L'ionophorèse est un phénomène physique dont la non-contingence est indiscutable. Il conviendra d'en étudier expérimentalement les modalités.

---

## CHAPITRE IV

---

### APPAREILLAGE

---

- I. — *Les sources de courant continu.*
  - II. — *Les systèmes de réglage.*
  - III. — *Le redressement du courant alternatif.*
  - IV. — *Le filtrage du courant redressé.*
  - V. — *La nature du courant filtré, ses effets.*
- Résumé.
- 

L'étude expérimentale de l'ionophorèse nécessite l'emploi d'une source de courant continu quelconque dont le débit est convenablement réglé et mesuré.

L'application clinique demandera à ce courant la qualité essentielle d'être à progression continue et lente, sans variations brusques d'intensité. En effet, ce n'est pas tant le passage du courant qui est sensible que ses variations ; et alors même qu'un malade supporterait une intensité de trois milliampères, il ne saurait tolérer la variation brusque de un cinquième de milliampère.

La tolérance du malade sera encore accrue si on adjoint au courant galvanique un très léger courant fara-

dique : courant de WATTEVILLE, justement vanté par M. F. GIDON.

• 1. — Les sources de courant continu.

Jusqu'à ce jour, l'électrothérapeute employait comme source de courant continu soit une batterie de piles ou d'accumulateurs, soit une dynâmo, soit le secteur industriel continu.

A l'heure actuelle, l'emploi du secteur continu est rejeté par l'unanimité des auteurs, à cause de son danger. Au Congrès de l'Association pour l'Avancement des Sciences, de 1925, à Grenoble, M. ZIMMERN s'élève contre ce procédé et dit qu'il a eu lui-même un accident. M. DEAN, de Londres, cite plusieurs cas mortels : il rappelle que la législation anglaise interdit l'emploi du courant du secteur en électrothérapie.

Les autres sources ont un défaut commun qui réside dans l'imperfection des systèmes de réglage ; peut-être importe-t-il peu, dans l'application du courant continu en électrothérapie générale, d'avoir quelques variations brusque du courant ; mais dans son application dentaire, les variations, si légères soient-elles, sont toujours extrêmement douloureuses.

Et c'est peut-être là un des obstacles qui ont entravé l'expansion de cette thérapeutique. Aussi avons-nous consacré une partie de nos efforts à la recherche d'une combinaison qui mettra le patient à l'abri de toutes les variations de courant pouvant survenir dans le système de réglage.

## II. — Systèmes de réglage.

Dans les procédés ordinaires, le système de réglage est composé d'un rhéostat ou d'un potentiomètre disposé sur le circuit même du patient ; et, sauf dans le cas de résistances liquides, les contacts sont métalliques et par suite imparfaits. (Variations par le passage d'une spire à l'autre ou par l'interposition de poussières, de particules d'oxydes.)

Le système à rhéostat ou résistance variable en série a l'inconvénient particulier de toujours donner une variation brusque de courant au début de l'application : l'intensité passe de zéro à une valeur, qui n'est jamais négligeable.

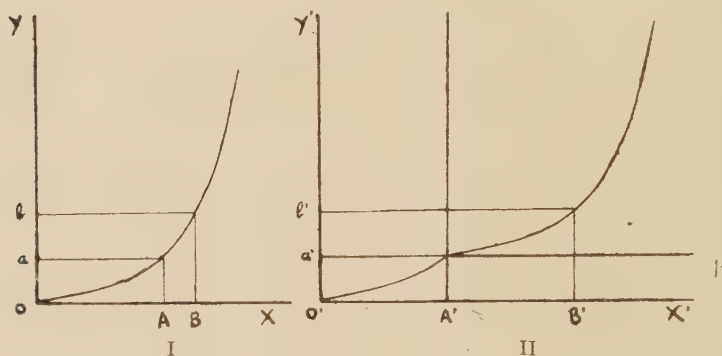
Le système à potentiomètre ou résistance en parallèle a l'inconvénient d'absorber une énorme quantité de courant comparativement à celle qui est utilisée.

Ces considérations nous ont conduit à adopter un système de réglage particulier basé sur le phénomène thermionique ou effet Edison, dont nous avons exposé le principe.

Le courant électronique, filament-plaque, est fonction de la température du filament ; c'est-à-dire fonction de l'intensité du courant qui alimente ce filament. Nous pourrions donc avoir une variation dans le circuit de plaque, qui sera le circuit d'utilisation, en agissant uniquement sur le circuit de chauffage du filament (circuit absolument indépendant).

L'expérience nous a montré que l'on obtient des variations rigoureusement et lentement progressives : toute

variation dans le circuit de chauffage étant amortie par le retard au refroidissement ou à l'échauffement du filament, n'est jamais ressentie par le patient. En particulier, une interruption brusque du courant du filament ne donne aucune réaction douloureuse — l'appareil de mesure indique d'ailleurs un retour relativement lent à la valeur 0.



OY = axe des intensités du courant de plaque.

OX = axe de température du filament (fonction inverse  $1/R$  des rhéostats).

La variation de l'émission des électrons par le filament en fonction de sa température n'est pas linéaire, elle est de la forme de la courbe I. Tandis que pour avoir une variation  $o a$  d'intensité, une variation de température  $o A$  a été nécessaire, une faible variation  $A B$  de température (c'est-à-dire une faible variation dans le courant de chauffage) a suffi pour faire varier l'intensité de la même valeur  $a b$ .

C'est pourquoi nous avons proposé l'emploi de deux rhéostats de chauffage disposés en série : l'un de résistance assez grande, l'autre de résistance bien plus faible. Le chauffage étant fonction inverse de la résistance, on

utilisera le premier rhéostat pour atteindre la valeur  $a'$ , et le second pour atteindre la valeur  $b'$  (courbe II). On obtient ainsi une progression lente du courant, condition essentielle pour faire tolérer au patient de fortes intensités.

### III. — Le redressement du courant alternatif,

Dans la pratique nous avons surtout utilisé comme source de tension plaque le courant alternatif industriel transformé et redressé.

A l'heure actuelle, les progrès de la technique radio-phonique ont donné naissance à de nombreux systèmes de redresseurs de courant alternatif, basés sur des principes différents. Le redressement par valves thermioniques offre l'avantage particulier de pouvoir s'adapter à la combinaison ci-dessus décrite.

Ce mode de redressement n'est pas une donnée de la technique nouvelle ; c'est FLEMMING qui, en 1890, a eu le premier l'idée d'utiliser le phénomène d'EDISON dans ce but. M. E. BLOCH en expose le principe de la façon suivante : « Si on établit une différence de potentiel alternative entre le filament et une électrode froide placée dans le voisinage, il passera un courant dans le vide pendant la phase du courant pour laquelle le filament est à un potentiel plus bas que l'électrode froide ; le courant s'annulera au contraire pendant la phase opposée ; pendant la première phase le courant est transporté par des électrons émis par le filament et se dirigeant vers l'électrode auxiliaire. »

Les premiers appareils redresseurs de courant ont été

fabriqués par les physiciens américains ; ils leur ont donné le nom de « kénotron » ; on les appelle encore aujourd'hui valve ou soupape thermionique.

Le principe a été appliqué par MM. les Professeurs CLUZET et CHEVALIER pour le redressement des courants de haute fréquence.

Lorsqu'on emploie une seule soupape, on réalise « le sens unique », mais une seule alternance est utilisée. Pour avoir le redressement complet, plusieurs systèmes peuvent être employés : combinaison à quatre valves, à deux valves avec deux transformateurs ; enfin combinaison à valve double, cette valve comprend un seul filament et deux plaques. C'est cette dernière combinaison qui nous a paru la plus pratique.

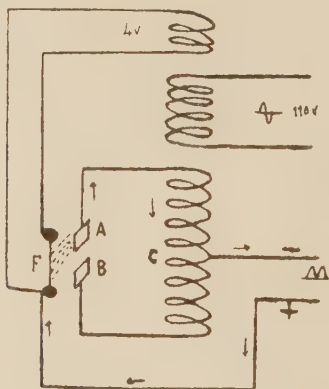


Fig. XII.

Pour cela on dispose d'un transformateur spécial (fig. XII), dans lequel le primaire est en relation avec le secteur (110 v.). Un secondaire (4 v.) fournit l'énergie qui alimentera le filament F ; et c'est sur ce circuit que

seront disposés les rhéostats de chauffage. Un autre secondaire donnera les tensions plaques alternatives ; pour cela, une prise médiane C constituera le pôle — du circuit d'utilisation, et les deux extrémités du transformateur seront reliées respectivement aux plaques A et B.

Lorsque A est positif, B est négatif, il s'établit un courant électronique entre F et A et les électrons s'écoulent vers C, comme le montre la figure, et reviennent au filament après avoir passé dans le circuit d'utilisation. Dans une seconde phase, B est positif, A est négatif, les électrons vont de F à B, s'écoulent vers C et le circuit du patient.

#### IV. — Le filtrage du courant redressé.

Nous aurons ainsi, entre la prise médiane C et le filament F, un courant ondulé mais à sens constant.

La fréquence d'ondulation est double de la fréquence alternative de la source. L'amplitude de ces ondulations est très grande, il convient de les amortir.

Pour cela, on emploie un système filtre essentiellement constitué par un ou deux condensateurs, en dérivation sur le circuit. Ces condensateurs tiennent lieu de réservoirs stabilisateurs, comme, a-t-on dit, « un lac dans lequel tombe un torrent ».

Au moment où la f. e. m. est maxima, le condensateur, dont la capacité est de l'ordre du microfarad, se charge; il se décharge, au contraire, lorsque la f. e. m. est minima

Pour diminuer encore les variations, on intercale dans le circuit une self de très forte inductance (plusieurs cen-

taines de Henrys) ; c'est-à-dire qui présente une très grande résistance au passage des variations de courant.

Mais la présence de condensateurs, de si forte capacité, aux bornes d'utilisation est un danger. Ils peuvent avoir une charge résiduelle ou accidentelle, lorsque, par exemple, le circuit est interrompu par un mauvais contact au niveau des électrodes. Lorsque le courant se rétablit, la décharge violente est douloureuse ; elle peut être dangereuse chez des sujets sensibles — nous avons été personnellement victime de cet accident lors de nos premiers essais.

Aussi nous avons proposé un système de sécurité en shuntant les condensateurs par une résistance convenablement choisie, d'après la capacité des condensateurs et la différence de potentiel à laquelle ils sont soumis.

L'expérience nous a montré que, dans ce cas, il n'y a jamais de décharge violente dans le circuit du patient.

#### V. — La nature du courant filtré et ses effets.

A la sortie du système de filtrage, le courant n'est pas rigoureusement continu. Il est ondulé toujours avec une fréquence de 100 périodes, mais l'amplitude de ces ondulations est extrêmement réduite ; on peut en juger par l'expérience suivante :

Quand on fait passer le courant ainsi obtenu dans un récepteur téléphonique, on n'entend aucun ronflement pour une intensité de un demi-milliampère. Lorsque l'intensité atteint deux milli, on entend un léger bourdonnement qui est net pour une intensité de trois milli. Etant donnée la sensibilité de semblables détecteurs de varia-

tions de courant, on peut apprécier la petitesse de ces variations qui sont absolument indolores.

Bien plus, ces ondulations paraissent jouer un rôle favorable dans la tolérance du patient ; comme l'adjonction du faradique au galvanique dans le courant de WATTEVILLE. En plus de notre appréciation personnelle, nous apportons celles de nos malades qui préfèrent l'application de ce courant ondulé à tout autre.

En effet, à partir d'une certaine intensité, le courant continu occasionne une sensation douloureuse aiguë ; l'adjonction d'un courant ondulé remplace cette douleur, que les patients qualifient de piquante, par une sensation vague, sourde, analogue à une pression ou à une légère trémulation.

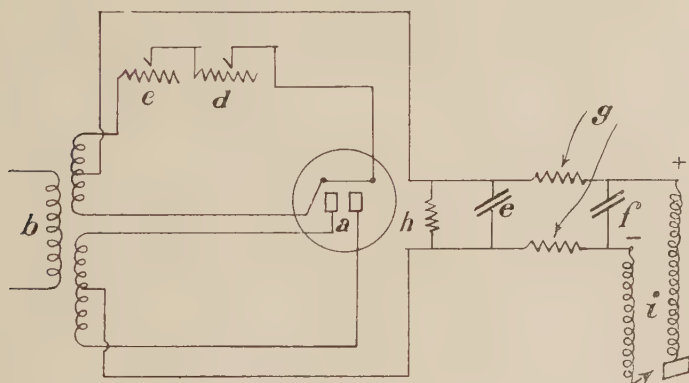


Fig. XIII. — SCHEMA GÉNÉRAL DE L'APPAREIL

- a* : Valve thermionique biplaque.
- b* : Primaire du transformateur.
- c, d* : Rhéostats de réglage du chauffage de filament.
- e, f* : Condensateurs du filtre.
- g* : Selfs du filtre.
- h* : Shunt protecteur.
- i* : Circuit d'utilisation, dans lequel on peut intercaler un milliampermètre.

La tolérance du malade est, de ce fait, accrue de façon très appréciable ; on peut, par ce moyen, appliquer des intensités bien supérieures (50 % en plus, dans plusieurs cas que nous avons notés).

\*  
\* \*

En résumé, l'appareil que nous avons construit (1) et employé dans toutes nos expériences, comparativement avec d'autres sources de courant, est essentiellement caractérisé par un système redresseur de courant alternatif, dans lequel sont réalisées les combinaisons ci-dessus décrites.

On réalise les avantages suivants :

- 1° Utilisation du courant alternatif industriel qui est de beaucoup le plus répandu ;
- 2° Aucun entretien. Encombrement minime ;
- 3° Aucun danger, le circuit d'utilisation étant isolé du secteur ;
- 4° Pas de variations brusques de courant ;
- 5° Production d'un courant faiblement ondulé, ce qui permet de faire supporter au patient, sans douleurs aiguës, des intensités très supérieures.

---

(1) Cet appareil a été breveté en juillet 1929.

## CHAPITRE V

---

### ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'IONOPHORÈSE

---

- I. — *Le mouvement des ions colorés.*
  - II. — *Etude spéciale de l'ion  $I^{3-}$ . (Expériences personnelles sur l'ion  $I^{3-}$ ).*
  - III. — *Discussion sur les vérifications expérimentales de la pénétration des ions.*
  - IV. — *Procédés physiologiques.*
  - V. — *Procédés électrolytiques.*
  - VI. — *Procédés chimiques.*
  - VII. — *Procédés des ions colorés.*
  - VIII. — *Cas expérimentaux.*
- 

#### I. — Le mouvement des ions colorés.

Le phénomène de migration des ions a été étudié par HITTORF : sa méthode indirecte consistait en des mesures sur la diminution des concentrations ioniques péri-polaires. Nous préférons le procédé plus direct, qui d'ailleurs aboutit à des résultats identiques, de l'examen du déplacement des ions colorés.

L'expérience peut être réalisée à l'aide d'ions simples : l'ion cuivre, des solutions de  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{SO}_4\text{Cu}$ , nous sera en particulier d'une grande utilité pour l'étude de la pénétration.

OSTWALD a montré, à l'aide des bandes d'absorptions, que la couleur d'une solution de permanganate était déterminée exclusivement par celle de l'ion  $\text{MnO}_4^-$ . « D'une façon générale, dit M. E. DARMOIS, la couleur d'un électrolyte est la somme des colorations de ses ions. »

Expérience citée par M. DARMOIS (fig. XIV).

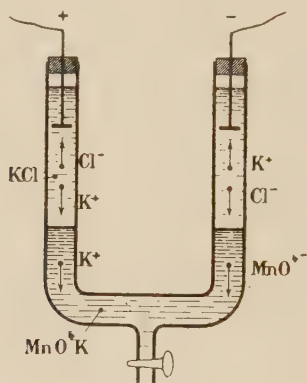


Fig. XIV.

« On électrolyse  $\text{MnO}_4\text{K}$  surmonté de  $\text{KCl}$ . Le schéma indique les directions de déplacement des ions. On constate que la surface de séparation progresse vers l'anode comme  $\text{MnO}_4^-$ . »

Dans cette expérience, la section du tube étant assez grande, les vitesses sont faibles : de l'ordre du centimètre à l'heure.

## II. Etude spéciale de l'ion $I^{3-}$ .

L'ionothérapie est très employée en Amérique dans le domaine de l'Odontologie. Les praticiens veulent pour la plupart lui donner le nom de médication électrolytique.

Nous avons vu qu'il conviendrait pourtant de réserver cette expression pour désigner la médication par les produits d'électrolyse.

L'ion le plus fréquemment employé est « l'ion iode » d'une solution, non pas d'iodure, mais iodo-iodurée. (Solution de LUGOL, de CHURCHILL).

Les auteurs avaient remarqué que la solution se décolorait progressivement à partir de la cathode. Ils en ont conclu que la solution entière était transportée et veulent voir dans ce phénomène une preuve de pénétration. Cette conclusion nous a paru un peu hâtive ; en effet : la décoloration progressive à partir de la cathode peut et, nous le verrons, doit être attribuée aux réactions électrolytiques de la cathode (formation de KOH qui produit une décoloration de l'iode en donnant des dérivés iodés).

La compréhension des faits ne peut être correcte que par la connaissance précise de la nature des solutions iodo-iodurées.

L'iode est normalement très peu soluble dans l'eau, sa solubilité est de l'ordre de  $1/5000$  ; par contre, l'iode se dissout abondamment dans un soluté d'iodure alcalin. Cette solubilité, en apparence paradoxale, doit être interprétée de la façon suivante : au contact de l'iodure, l'iode forme un periodure  $I^3K$ , ce qui revient à dire qu'une molécule  $I_2$  s'unit à un ion  $I^-$  pour former « l'ion complexe  $I^{3-}$  », comme dit M. Marcel BOLL, MENDELEEFF

avait déjà constaté la présence du composé fini  $I^3K$  : « Ainsi — dit-il, en citant GIRAULT et JÖRGENSEN — la solution alcoolique de  $I^3K$  n'abandonne pas l'iode au sulfure de carbone, bien que ce dernier enlève l'iode de la solution alcoolique de ce métalloïde. »

En définitive, dans une solution iodo-iodurée, nous avons des ions  $K^+$ , des ions  $I^-$  et des ions  $I^{3-}$ , avec probablement des molécules d'iodes non combinées dissoutes dans leur proportion habituelle de 1/5000.

#### *Expériences personnelles sur l'ion $I^{3-}$ .*

Un tube de verre en U, effilé à ses extrémités, contenant une solution de LUGOL, est renversé et chaque branche du tube plonge dans une cuve électrolytique à NaCl (fig. XV) ; chacune de ces cuves est reliée par une électrode à un pôle d'une source de courant continu.

Lors du passage du courant à une intensité d'environ 3 milliampères, on observe :

1° La formation d'un anneau coloré de concentration A à la partie inférieure de la branche gauche du tube en U.

2° Au bout de quelques secondes, un filet coloré descend de cet anneau dans la cuve positive, et se répand en nuage vers le fond de la cuve, en étant dévié vers l'anode.

3° Après quelques minutes, le nuage rouge brun est devenu plus épais, sans cesse alimenté par le filet venant du tube en U ; aucune modification apparente n'est survenue dans la branche et la cuve négative.

4° Après un quart d'heure environ, le nuage coloré envahit la partie inférieure de la cuve positive ; et, du

côté de la branche négative, on constate une zone inférieure moins colorée comprise entre les deux surfaces de séparation  $N N'$ , la surface inférieure  $N$  est immobile, la supérieure  $N'$  s'élève lentement.

L'interprétation de ces phénomènes exige tout d'abord l'élimination de deux causes d'erreurs :

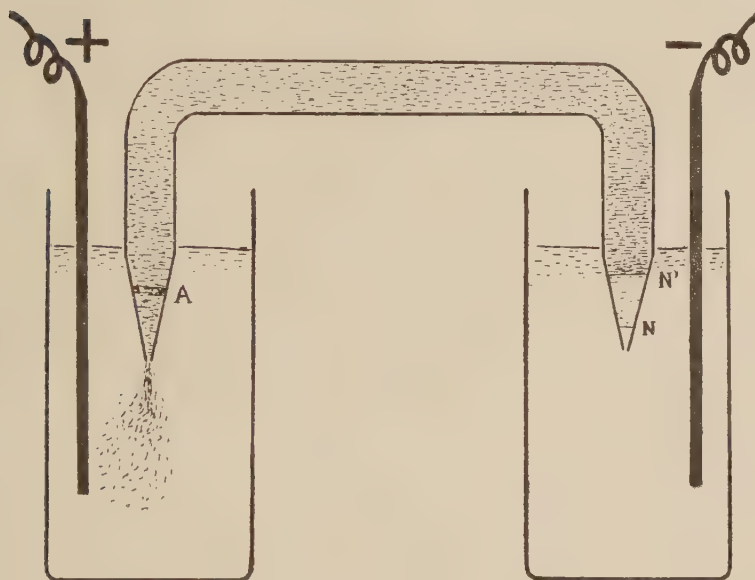


Fig. XV.

1° Il peut y avoir une différence de niveau originelle ou accidentelle entre les deux cuves électrolytiques. Dans ce cas, en effet, le tube en U joue le rôle de syphon ; il s'établit un courant liquide, qui entraîne la solution de LucOL vers la cuve dont le niveau est inférieur. Pour éviter toute perturbation, il faut immobiliser les cuves et les faire communiquer par un syphon à grande section,

que l'on supprimera au moment de l'établissement du courant électrique.

2° Une autre cause d'erreur survient, si la densité de la solution de NaCl est inférieure à la densité du LUGOL. Dans ces conditions, le lugol descend du tube vers le fond des deux cuves, indépendamment de tout passage de courant.

Ces causes d'erreur seront éliminées, avec certitude, si l'appareil est mis en ordre de marche et en observation pendant un certain temps. Aucune perturbation n'étant survenue, on observe à ce moment ce qui se passe, lorsque le circuit est établi.

La première interprétation doit porter sur la nature du nuage coloré qui descend vers le fond de la cuve.

1° Ce n'est pas la solution de LUGOL qui descend en masse, car ayant une densité moindre que l'électrolyte NaCl et elle monterait plutôt à la surface, et, d'autre part, le niveau coloré N de la branche négative s'élèverait. Ces deux phénomènes se réalisent d'ailleurs lorsque le niveau d'une cuve s'élève et que le LUGOL se déplace en masse.

2 Ce n'est pas non plus un déplacement de molécules d'iode, nous l'avons prouvé par l'expérience suivante :

Si, dans le tube en U, on place, au lieu d'une solution iodo-iodurée, une dissolution d'iode pur dans de l'eau distillée ou salifiée par du NaCl, on ne peut constater le moindre déplacement d'iode, même après avoir fait passer le courant pendant vingt-quatre heures.

Nous sommes donc conduits à admettre que c'est un nuage d'ions  $I^{3-}$  qui se déplace vers le pôle + et, comme ces ions sont plus lourds que les ions  $Na^+$  et  $Cl^-$ , ils tombent au fond de la cuve.

Une seconde interprétation doit résider sur la nature de la zone moins colorée comprise entre les deux surfaces de séparation N et N'.

Il s'agit vraisemblablement d'une solution des molécules  $I^2$  non combinées qui ne subissent pas l'action ionophorétique ; en effet :

1° L'intensité de la coloration correspond approximativement à celle obtenue par une solution à 1/5000 d'iode pur.

2° Si, au lieu d'une solution de LUGOL fraîchement préparée, on emploie une solution datant de plusieurs mois — dans laquelle il est établi que l'iode libre « s'altère », c'est-à-dire entre en combinaison avec diverses substances de l'eau impure — on n'observe pas cette zone moins colorée, la surface de séparation est unique et s'élève dans le tube.

Au cours de ces expériences, nous avons observé que l'interruption du courant électrique n'arrêtait pas immédiatement le mouvement du filet coloré. Lorsque l'expérience a duré quelques minutes, le mouvement se poursuit pendant quelques secondes ; lorsque l'expérience a duré plusieurs heures, c'est pendant cinq minutes, et même davantage, que le filet coloré continue sa descente.

Comme ces phénomènes s'accompagnent de la disparition de l'anneau coloré A, nous pensons qu'il s'agit d'une simple diffusion de la concentration, qui se produit lorsque les causes électriques ont cessé d'agir.

### III. — Discussion sur les vérifications expérimentales de pénétration ionique.

On dit souvent qu'un immense fossé sépare le point de vue théorique et expérimental du résultat pratique ; ce fossé est en réalité notre ignorance des facteurs intermédiaires.

Une différence peut apparaître, soit parce qu'une donnée conditionnelle est inconnue dans le problème théorique, soit à cause d'une imperfection dans la mesure des résultats pratiques.

#### *Premier exemple de donnée inconnue : les ions parasites.*

Si un électrolyte, KI par exemple, est impur, les ions accessoires électro-négatifs émigreront en même temps que les ions  $I^-$  ; « en proportion de leur nombre relatif », comme nous l'a fait remarquer M. CHANOT.

Et alors même que la solution de KI serait pure au début de l'expérience, il n'en est plus de même après quelques instants ; les phénomènes électrolytiques de la cathode donneront des ions électro-négatifs  $OH^-$  ( $K + H^2O = KOH + H^+$ , il y a dissociation de KOH en  $K^+$  et  $OH^-$ ) ; or, les ions  $OH^-$  ont une vitesse beaucoup plus grande que les ions  $I^-$  et, après quelques minutes, on aura surtout une pénétration des ions  $OH^-$  dont le nombre va d'ailleurs en croissant.

D'après la méthode de BOURGUIGNON et CONDUCHÉ, la quantité d'iode introduite en pratique, mesurée par l'iode resté sur l'électrode, est toujours inférieure à la quantité indiquée par le calcul. Cette différence, à notre avis, est

due à une faute de technique plutôt qu'à l'imperfection de la formule théorique : Dans la pratique, il importe de renouveler l'électrode avant que les ions  $\text{OH}^-$  ne soient arrivés au contact de l'organisme.

De semblables facteurs n'interviennent pas dans l'emploi des électrodes dites solubles. Dans l'ionophorèse des ions  $\text{Zn}^{++}$ , l'anode étant constituée par un fil de ce métal, les phénomènes électrolytiques aboutissent à la production de  $\text{ZnCl}_2$ , et les nouveaux ions électro-positifs formés sont encore des ions  $\text{Zn}^{++}$ .

*Second exemple de donnée inconnue :  
précipitations des ions.*

Les auteurs qui ont essayé de faire pénétrer l'ion argent se sont heurtés à l'obstacle suivant : les ions  $\text{Ag}^+$ , aussitôt leur formation dans le cas d'électrodes solubles ou au contact des humeurs chlorurées de l'organisme,

c'est-à-dire en présence d'ions  $\text{Cl}^-$  — donnent un précipité de chlorure d'argent insoluble et de ce fait, la résistance électrique croît de façon fort appréciable.

De là, conclure et généraliser que la pénétration des ions est illusoire il n'y a qu'un pas, qui a été franchi par des auteurs !

*Exemple de l'imperfection dans la mesure des ions  
introduits.*

Il est extrêmement difficile de mesurer directement la quantité d'ions introduits, il faut la rechercher dans les émonctoires ; cela a été tenté pour l'ion  $\text{I}^-$  dans les urines. Mais on ne peut demander à cette recherche qu'un résultat qualitatif et non quantitatif ; en effet :

1° l'élimination urinaire de l'iode se fait avec un seuil et avec retard ; 2° elle peut se prolonger à des taux non dosables ; 3° il y a une accumulation thyroïdienne.

Il résulte donc que, pour connaître d'une manière relative la quantité d'ions introduits, il faut mesurer la quantité perdue par l'électrode ; et, si l'on n'a pas d'ions parasites, on peut faire un calcul en partant de la formule de FARADAY.

#### IV. — Procédés physiologiques.

On peut avoir un contrôle de pénétration ionique par les effets physiologiques. Ce sont les procédés qui, en général, ont la plus grande faveur des praticiens ; ils sont pourtant les plus imparfaits.

Certes, nous ne nierons pas la grande valeur des expériences, devenues célèbres, de St. LEDUC. Lorsqu'il fait pénétrer l'ion strychnine ou l'ion cyanogène dans l'organisme de lapins, les convulsions tétaniques d'une part, l'intoxication cyanique d'autre part, apportent un test indiscutable.

Mais il ne faut pas perdre de vue que les effets physiologiques seront toujours d'une interprétation douteuse : « Une manifestation phénoménale même élémentaire, dit le Professeur PACHON, est commandée par une foule de facteurs qui font qu'elle n'est pas toujours égale à elle-même, qu'elle n'est pas constamment isodynamique, qu'elle peut subir, et qu'elle subit en fait à tous instants des modifications extrêmement considérables ».

Un effet physiologique pourra donner un résultat en plus ou un résultat en moins, souvent en plus, car à la pénétration des ions, il s'ajoute des effets d'électrolyse

polaire et interpolaire. « Certains ions, disent MM. DELHERM et LAQUERRIÈRE, provoquent des réactions plus ou moins tardives selon les cas et pouvant avoir une période de latence analogue à celle des radiodermites ». C'est ainsi que la cocaïne introduite à travers la peau donne à très faibles doses des actions locales diverses : anémie, œdème, paralysie vasculaire, desquamation.

Cependant, nous ne rejètons pas absolument ce procédé, ce sera même celui que nous citerons dans nos observations cliniques. L'effet thérapeutique doit apporter sa part dans les conclusions.

#### V. — Procédés électrolytiques.

Lorsqu'un ion est incolore, tandis que son atome est coloré ou directement détectable, sa présence sera reconnue au pôle où cet ion devient atome ; c'est-à-dire au pôle où se manifeste l'électrolyse.

Ainsi, dans l'expérience de CHATZKY : « Un fragment de pomme de terre est creusé d'un trou, dans lequel on met une solution d'iodure de potassium ; si on pique deux aiguilles formant électrodes dans la pomme de terre, on voit l'iode colorer la pomme de terre au niveau de l'aiguille positive, sur une zone plus ou moins large (actions polaires et interpolaires) ». (Rapporté par DELHERM et LAQUERRIÈRE.)

Nous avons réalisé l'expérience analogue à travers les tissus dentaires : Une dent est implantée dans une pomme de terre, l'électrode positive est placée au voisinage de l'apex, l'électrode négative est placée dans la chambre pulpaire qui contient une solution de KI. Après un

temps, variable avec l'intensité, on constate la coloration bleue noire péri-anodique.

Mais nous n'avons attaché à cette expérience qu'une valeur relative ; car elle ne permet pas d'étudier les voies de pénétration des ions et pourrait conduire à des interprétations erronées, comme dans l'expérience d'ENSCH :

Une grenouille vivante établit la connexion entre deux récipients contenant, l'un de l'iodure de potassium, l'autre une solution de NaCl (fig. XVI). On relie la solution

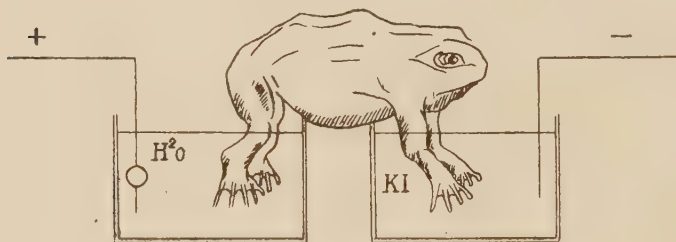


Fig. XVI (expérience d'ENSCH).

d'iodure au pôle négatif et la solution de NaCl au pôle positif. « On constate que l'iode apparaît au bout de quelque temps dans le récipient positif, après avoir par conséquent, disent les auteurs, traversé le corps de la grenouille ».

Cette conclusion nous paraît un peu hâtive ; il aurait été nécessaire de rechercher au préalable les ions  $I^-$  à l'intérieur de la grenouille.

L'iode aurait traversé le corps de la grenouille en 45 minutes ; cette vitesse est très grande et nécessite une densité électrique considérable. Cette densité ne peut être réalisée qu'avec une intensité de plusieurs ampères, car la section de la grenouille est de l'ordre de plusieurs

centimètres carrés ; or, l'intensité, dans l'expérience, n'était que de 5 milliampères !

D'autre part, il convient de remarquer que la peau de la grenouille est particulièrement imperméable ; par contre, sa surface est humide, c'est-à-dire conductrice. La section de cette couche humide est très faible, on a une grande densité électrique, et par suite, une grande vitesse de déplacement des ions à la surface de la peau. L'interprétation est donc absolument erronée : il y a eu transport superficiel et non pas pénétration des ions.

## VI. — Procédés chimiques.

### A. — *Détection colorée des ions Fer avec le ferricyanure de potassium.*

L'idée d'un tel procédé avait déjà été émise par M. STURRIDGE (*Dental Cosmos*, 1923, p. 733). Une dent est fraîchement extraite ; on remplit la chambre pulpaire avec une solution à 5 % de sulfate de fer, après « avoir débarrassé le canal de tous les débris pulpaires ». Dans la solution est placée une électrode d'acier que l'on enfonce « aussi profondément que possible ». On fait passer le courant pendant 5 minutes à 5 milliampères. La dent est alors sciée transversalement et placée dans une solution à 10 % de ferricyanure de potassium « pendant 4 heures ». Le canal et les tubuli seront alors colorés en bleu de prusse. L'auteur en conclut : « Les ions Fer ont pénétré profondément dans les tubuli ».

Nous pensons que cette méthode expérimentale est en défaut sur plusieurs points :

1° Le séjour prolongé de la dent dans le ferricyanure

peut mettre en doute la pénétration électrique des ions Fer ; cette pénétration a pu se réaliser par capillarité pendant le temps d'immersion (4 heures).

2° Le fait de débarrasser le canal de tous ses débris pulpaire et d'enfoncer l'électrode très profondément dans le canal, place l'expérimentateur dans des conditions vraiment favorables à une pénétration, qui ne sont pas toujours réalisées dans la pratique.

Nous avons fait de nombreuses expériences analogues, mais avec un contrôle immédiat :

La dent à expérimenter est placée à la partie supérieure d'une branche d'un tube en U contenant une solution de NaCl. Dans l'autre branche plonge la cathode. L'anode est constituée par une sonde d'acier placée simplement dans la chambre pulpaire, avec ou sans solution de sel de fer.

De minute en minute, une goutte de ferricyanure est déposée vers l'extrémité des racines ; les orifices des canaux apparaissent en bleu, au moment même où les ions Fer arrivent au contact du ferricyanure.

(Voir expériences et planche en couleurs.)

#### B. — *Détection colorée des ions $I^3$ .*

Les ions  $I^3$  ne sont pas toujours visibles et leur couleur peut être confondue avec celle des débris organiques, mais ils sont détectés en bleu noir par l'amidon.

Nous avons réalisé l'expérience suivante :

Une dent est enfoncée dans une pomme de terre reliée au pôle +, le pôle — étant en contact avec une boulette de coton imprégnée d'une solution de LUGOL, placée dans la chambre pulpaire. Après quelques minutes, lorsque le

colon est complètement décoloré, la dent est extraite de la pomme de terre ; dans le fond de l'alvéole artificielle apparaît une coloration bleue noire due à l'action de l'iode sur l'amidon du tissu végétal.

#### VII. — Procédé des ions colorés.

C'est le procédé qui a permis l'étude de la migration des ions au sein d'un électrolyte. Son application pour l'étude de la pénétration est des plus intéressante.

##### *Expérience dans les tissus végétaux :*

Un fragment de pomme de terre de la grosseur et de la longueur d'une allumette est placée sur un corps isolant. Chaque extrémité est reliée par une électrode en cuivre à la source de courant continu.

Les phénomènes secondaires de l'électrolyse anodique donnent des ions  $\text{Cu}^{++}$  colorés en vert qui émigrent vers l'anode. Des coupes transversales permettent de constater que le mouvement des ions ne s'est pas effectué seulement en surface, mais aussi à l'intérieur du tissu végétal ; il y a donc bien eu pénétration.

##### *Expérience dans les tissus dentaires :*

Dans les tissus dentaires, les ions colorés  $\text{Cu}^{++}$  ont fourni le procédé de choix pour étudier les voies de pénétration.

Une électrode positive en cuivre plonge dans la chambre pulpaire, qu'il est utile de remplir d'une solution de  $\text{So}^4 \text{Cu}$ , car, par suite de l'électro-osmose, il y a déshydratation anodique et la résistance au courant croît de façon appréciable.

Après le passage du courant pendant 5 à 10 minutes, on pratique des sections transversales et longitudinales des racines. On constate alors la coloration verte : 1° des filets radiculaires ; 2° de l'ivoire jusqu'à la surface des racines.

Cette pénétration dans les canalicules dentinaires ne nous a pas paru devoir être attribuée seulement à une ionophorèse. En effet : Nous avons placé dans des canaux larges des solutions de  $\text{So}^4 \text{Cu}$  ; après un séjour de quelques heures, l'ivoire était colorée, sans avoir fait intervenir de courant électrique. Il y avait donc eu osmose ou diffusion capillaire (fig. 5 de la planche en couleurs).

Ceci met donc un doute, sur l'interprétation des auteurs qui ont essayé l'inophorèse ou l'électrophorèse colorée dans les canalicules dentinaires. Ainsi, M. BÖDECKER a étudié (*Dental Cosmos*, 1927), la pénétration de colorants colloïdaux divers. Son attention a été attirée surtout par la pénétration dentinaire. Or, nous venons de le voir, cette pénétration peut être indépendante de toute action électrique.

Par contre, nous avons maintes fois placé une solution de  $\text{So}^4 \text{Cu}$  dans une chambre pulpaire, pendant des jours entiers et sans appliquer de courant. Jamais nous n'avons observé de coloration des canaux étroits et de l'ivoire radiculaire.

En définitive, la pénétration intra-radiculaire (dans le cas de canaux inaccessibles mécaniquement), ne peut être obtenue que par inophorèse. La pénétration intradentinaire est secondaire à la présence des ions considérés dans les canaux correspondants.

### VIII. — Cas expérimentaux.

(Laboratoire de Physique de la Faculté de Médecine.)

Nos expériences sur la pénétration des ions dans les tissus dentaires ont porté sur plus de 100 cas qui ont toujours donné des résultats positifs. Nous ne présentons ici que quelques cas particuliers, typiques de certaines conditions morphologiques et pathologiques.

D'une façon générale, que les canaux aient contenu un filet non infecté, ou des débris gangrenés de pulpe, la pénétration a été constante. Nous n'avons observé que des différences de résistances électriques, d'ailleurs facilement vaincues par une augmentation de potentiel.

Dans certains cas cependant, nous avons constaté des intensités limites de 2 ou 3 milliampères, qui ne pouvaient être dépassées par une augmentation de potentiel.

Cette résistance paraît être en relation avec une déshydratation des tissus, lorsque le moment de l'expérience était éloigné du moment de l'extraction.

Nous avons également expérimenté — dans le Service de M. le Médecin Commandant ROMÉY — *in vivo* sur des dents dont l'extraction était pratiquée aussitôt après. Il n'y a aucune différence à signaler quant au résultat.

**Expérience N° 1** (fig. 4 de la planche en couleurs).

Une première grosse molaire inférieure est extraite pour cause de pulpite ; ses deux racines sont nettement espacées.

La racine antérieure seule plonge dans la cuve électrolytique, l'autre racine est bien isolée de la paroi.

La chambre pulpaire est remplie d'une solution de sulfate de cuivre reliée au pôle +.

Après un temps non mesuré, les deux racines sont sectionnées transversalement à la pince.

Le canal antérieur est très étroit, son filet pulpaire est coloré en vert ainsi que la surface de la racine antérieure.

Le canal postérieur est large, son filet est demeuré rouge.

Nous en concluons que la pénétration est due uniquement au courant ; dans le canal postérieur, pourtant largement ouvert, aucune coloration ne s'est manifestée ; il n'y a pas eu de pénétration osmotique ou capillaire.

**Expérience N° 2** (fig. 8 A et B de la planche en couleurs).

Deuxième grosse molaire inférieure atteinte de mortification pulpaire, extraite à l'Ecole dentaire de Lyon.

Le canal postérieur n'est que partiellement sondable ; le canal antérieur ne l'est pas du tout (les racines sont fortement coudées).

La chambre pulpaire est remplie d'une solution de sulfate de cuivre et reliée au pôle + par une électrode de cuivre ; les racines enfoncées dans une pomme de terre reliée au pôle —.

Après 20 minutes environ, le courant ayant passé avec une intensité de 2 milliampères, la dent est extraite de la pomme de terre qui présente une coloration verte à l'emplacement de l'apex des racines.

La section longitudinale, suivant le plan des deux racines, a donné les résultats suivants :

# PLANCHE I



REPRODUCTION EN QUADRICHRONIE DES DENTS  
DÉCRITES DANS "LES CAS EXPÉRIMENTAUX"

Fig. 9. — Pièce anatomopathologique de l'observation n° 7



1° Les filets radiculaires sont fortement colorés en vert jusqu'à leur extrémité inférieure.

2° Le canal antérieur est étroit et coudé dès son quart supérieur (A).

3° Les ions Cu ont traversé l'ivoire par les canalicules dentinaires et ont coloré en vert la surface des racines (B).

**Expérience N° 3** (fig. 1 A et B de la planche en couleurs).

Il s'agit d'un grosse molaire supérieure atteinte de pulpite ; extraction faite par M. le Docteur TELLIER, dans son service de l'Hôtel-Dieu.

Cette dent est présentée aux étudiants en signalant l'intérêt qu'il y aurait à connaître la direction des canaux des deux racines vestibulaires. Ces racines sont en effet coudées dans leur tiers supérieur et font, avec leur direction primitive, un angle dépassant 45°.

Le sondage de ces canaux ne dépasse pas le premier tiers de leur longueur totale.

Les apex des trois racines ont été atteints par les ions Fe, en 15 minutes, par le passage d'un courant de 2 milliampères  $\frac{1}{2}$ .

La section longitudinale suivant le plan des deux racines vestibulaires est représentée en B de la fig. I.

La coloration bleue du canal ne paraît pas se continuer jusqu'à l'extrémité de la racine de droite ; en réalité le canal dévie et vient déboucher en avant du plan de section, ainsi qu'il est apparent sur la fig. A. (La racine palatine a été sectionnée à sa partie médiane pour permettre la visibilité de l'orifice apexien de la racine de droite.)

**Expérience N° 4** (fig. 3 de la planche en couleurs).

Une canine supérieure gauche vient d'être extraite dans un but prothétique ; elle présente une longueur totale de 35 millimètres ; longueur d'autant plus extraordinaire qu'il s'agissait d'une très petite bouche, chez une personne de 62 ans.

Après trépanation, on constate que le canal n'est pas sondable au delà de la moitié de la longueur de la racine.

La sonde d'acier est alors laissée en place et reliée au pôle +. Les ions Fe sont alors apparus à l'apex, après le passage, pendant 6 minutes, d'un courant de 3 milliam-pères.

La racine est sectionnée longitudinalement, et, sur la coupe, une goutte de la solution de ferricyanure de potassium détecte en bleu les ions Fe du canal radiculaire, qui, dans son tiers inférieur, est très étroit et coudé.

**Expérience N° 5** (fig. 6 de la planche en couleurs).

Première grosse molaire supérieure à racines divergentes, extraite pour cause de gangrène pulpaire.

La chambre pulpaire est débarrassée de ses débris alimentaires et organiques. Le canal palatin est très large et rectiligne. Les canaux vestibulaires sont étroits et ne peuvent être sondés sur plus du quart de leur longueur.

En employant la technique précédente, les ions Fe sont apparus à l'apex en 8 minutes, avec une intensité de 3 milliampères.

L'intérêt particulier de cette expérience réside surtout dans le fait qu'une des racines vestibulaires présente une double coloration bleue correspondant : 1° au canal principal, et 2° à un canal accessoire d'AGUILHON DE SARAN.

**Expérience N° 6** (fig. 2 de la planche en couleurs).

Cette deuxième grosse molaire supérieure a été extraite à l'Ecole dentaire de Lyon, parce qu'elle était cause de phénomènes inflammatoires très douloureux, ayant résisté à toute tentative de thérapeutique par des procédés habituels.

Les trois racines de cette dent sont soudées ; le canal palatin est assez facilement accessible ; les autres ne le sont absolument pas. La racine vestibulaire antérieure présente une coudure à angle droit.

Une solution de perchlorure de fer avec une électrode d'acier est placée dans la chambre pulpaire. Avec un courant de 3 milliampères, l'apex du canal palatin se colore en bleu au bout de 6 minutes. Les apex des deux racines vestibulaires n'ont été atteints qu'après 15 minutes. La racine coudée présente en outre un orifice de canal accessoire.

La longue durée d'application nécessaire, pour faire apparaître les ions Fe aux apex des racines vestibulaires, est due vraisemblablement à une obturation partielle des canaux par refoulement des débris organiques, lors des tentatives de traitement.

La surface de la racine coudée présente une teinte rouille, survenue après quelques heures, au moment de la dessiccation de la dent ; cette teinte est due à la présence d'ions Fe en grande abondance. Pareil fait a été constaté dans des cas analogues, toutes les fois que l'intensité du courant a été forte ou que son application a été longue.

**Expérience N° 7** (fig. 7 de la planche en couleurs).

Cette deuxième prémolaire présente à l'extraction un kyste appendiculaire.

Une électrode en fer est placée dans le canal et la racine plonge dans la cuve électrolytique. Le courant ayant passé pendant 8 minutes, à une intensité de 3 milliampères, une goutte de ferricyanure de potassium est placée sur le kyste qui se colore fortement en bleu.

Les ions Fe ont donc traversé le kyste et atteint sa périphérie.

\*  
\* \*

Ces résultats expérimentaux imposent la conclusion de M. le Docteur PONT :

« L'ionophorèse, mieux que toute autre méthode, permettra de désinfecter rigoureusement les racines coudées, en baïonnettes et, d'une façon générale, toutes celles dont l'apex est difficile à atteindre et par conséquent à stériliser. »

---

## CHAPITRE VI.

---

### ACTION PHARMACODYNAMIQUE DES IONS

---

- I. — *Propriétés pharmacodynamiques générales des ions.*
  - II. — *Propriétés particulières :*
    - a) *Ions métalliques ;*
    - b) *Ions électro-négatifs ;*
    - c) *Ion I<sup>3</sup>.*
  - III. — *Résultats cliniques.*
- 

#### I. Propriétés générales des ions.

Dans la pratique de la thérapeutique dentaire, divers ions ont été employés :

L'ion cocaïne, à travers les canalicules des dentines hypersensibles, par le Docteur PONT, et depuis, par le Docteur MENDEL Joseph.

L'ion zinc, comme antiseptique, par les Docteurs MENDEL, GUEBEL, STURRIDGE et M. BOUCHARD à Lyon.

L'iode des solutions iodo-iodurées est employé en Amérique par de très nombreux praticiens ; à Lyon, par M. BOUCHARD. Nous avons montré qu'il s'agissait dans

ce cas d'un ion  $I^3$ . Déjà le Docteur PONT en avait proposé l'emploi, lorsqu'il formulait la solution: KI à 50 % 5 gouttes, teinture d'iode 2 gouttes, teinture d'aconit 2 gouttes.

Nous ne voulons retenir pour le moment que les ions employés dans un but antiseptique:

On nous a souvent objecté que nous n'obtenons qu'un transport d'ion et non pas de la molécule entière, et que d'autre part, les ions n'ont pas l'affinité chimique de leur atome, qu'en conséquence on ne conçoit pas très bien leur mode d'action pharmacodynamique.

Nous répondrons à ces objections en citant M. le Professeur MOREL, qui nous disait un jour :

« Les agents antiseptiques sont de constitutions chimiques très différentes et d'effets physiques très différents ; on ne peut pas faire une théorie générale, il faut faire des catégories ».

Dans le premier groupe d'antiseptiques, ceux qui agissent en donnant lieu à des combinaisons avec les matières protéïques des microbes, on distingue un sous-groupe, celui des antiseptiques qui agissent à l'état d'ions :

« Les ions seront soit des métalloïdes-halogénés, tels que F. Br. Cl. I. ou des radicaux acides fortement électro-négatifs, qui peuvent donner avec les matières protéïques des combinaisons peu solubles et incompatibles, à cause de leur différence avec les produits naturels, avec la vie des microbes. Ou bien, des ions métalliques Pb Hg, Bi, Cu, Zn, qui donnent des combinaisons avec les matières protéïques, lesquelles sont insolubles, mais qui, pour ce faire, exigent que le métal puisse être facilement arraché au groupement auquel il était combiné, c'est-à-dire soit sous une forme ionisable. »

Si l'ion n'a plus les mêmes propriétés que son atome, si ses affinités chimiques sont disparues, il n'en a pas moins des propriétés nouvelles : un ion a des affinités électriques. Il peut s'associer, par exemple, à un autre ion pour former une molécule, et peut venir « salifier » — c'est le mot que l'on emploie — les groupements basiques ou acides des albuminoïdes bactériennes.

L'action antiseptique des colorants en général serait également due à un effet ionique. « Il est nécessaire que le colorant ait subi l'action de l'eau et de certains agents comme des bases ou des acides forts, susceptibles de les faire passer sous la forme que les chimistes coloriques appellent : quinonique, dans laquelle il y a une partie de la molécule qui est ionisable ».

Enfin, un autre mode d'action antiseptique des ions peut intervenir : Les ions peuvent se fixer sur les micelles et troubler l'état électrique des colloïdes microbiens et en provoquer la floculation. Or, comme l'a montré M. A. LUMIÈRE, « l'état colloïdal conditionne la vie, la floculation détermine la maladie et la mort ».

## II. — Propriétés particulières de certains ions.

### a) Ions métalliques.

Les plus employés en odontologie sont l'ion  $Zn^{++}$  et l'ion  $Cu^{++}$ . Nous avons vu que l'ion  $Ag$  ne peut être employé pour l'ionophorèse, car il précipite au contact des chlorures organiques.

Du point de vue électrique, les ions monovalents ont un gros avantage, car ils ne possèdent qu'une seule

charge positive, tandis que le  $\text{Zn}^{++}$  et le  $\text{Cu}^{++}$  en possèdent deux. Ainsi, pour une même quantité d'électricité, correspondant au transport d'un ion  $\text{Zn}^{++}$  ou  $\text{Cu}^{++}$ , nous aurons le transport de deux ions :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  ou  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{I}^3$ .

Dans la pratique, la conclusion sera la suivante : pour avoir le transport d'une même quantité d'ions, il faudra une application deux fois plus longue de courant avec le zinc et le cuivre qu'avec les autres corps monovalents, toute chose égale du côté de l'intensité.

Le cuivre a le gros inconvénient de colorer les tissus dentaires en vert ; aussi son indication sera surtout dans le traitement des fistules comme l'indique le Docteur FETTE.

L'ion  $\text{Zn}^{++}$  a une action coagulante sur les albuminoïdes ; ce qui fait qu'« il ne diffuse absolument pas » (LEDUC). Malgré tout, cette coagulation n'empêche pas l'ionophorèse. En dehors du traitement de la pyorrhée, proposé par M. STURRIDGE, nous pensons que son emploi restera localisé à des buts préventifs, par exemple : lorsqu'un canal a été inaccessible, qu'il contient des débris pulpaire ou le sang d'une hémorragie, l'ion  $\text{Zn}$  coagulera les albuminoïdes organiques et restera sur place, prévenant ainsi l'infection possible de ce canal qui n'a pu être obturé.

#### b) Ions halogénés.

Les halogènes sont monovalents, leurs ions possèdent une seule charge négative élémentaire, et leur vitesse de migration est maximum.

Certains auteurs ont, à notre avis, trop insisté sur la

valeur de l'ion  $\text{Cl}^-$ . Il n'a aucune valeur antiseptique appréciable ; il favorise même le développement de certaines bactéries, par exemple dans le milieu gelo-pepto-sel. On a bien invoqué que la pénétration des ions  $\text{Cl}$  modifiait l'état des humeurs ; que les ions  $\text{Cl}$  se substituaient aux divers ions électro-négatifs. Mais cette substitution entraîne une perturbation si faible, que nous la considérons comme négligeable.

Si on a obtenu des résultats thérapeutiques intéressants avec l'ionophorèse de  $\text{Cl}^-$ , c'est en réalité par des effets très différents : 1° électrolyse interpolaire ; 2° surtout ionophorèse de  $\text{OH}^-$ , produit par l'électrolyse anodique, comme nous l'avons montré pour les ions  $\text{I}^-$ .

L'ion Fluor peut être intéressant, car il produit une véritable « fossilification » des tissus dentaires par formation de fluorophosphates. Mais son action n'a pas encore été essayée sur des dents *in vivo*.

### c) Action de l'ion $\text{I}^3$ .

L'iode a une valeur en ionophorèse surtout sous la forme d'ions  $\text{I}^{3-}$  des solutions iodo-iodurées, car nous avons le transport à la fois d'un ion  $\text{I}^-$  et de deux atomes ( $\text{I}^2$ ).

Avec l'ion  $\text{I}^3$ , nous avons une double action : action antiseptique de  $\text{I}^2$ , action lymphogène de  $\text{I}^-$ . Et, dans les foyers infectés, nous aurons dans un premier temps, une destruction bactérienne, et dans un second temps, une phagocytose des débris organiques, leur élimination et une reconstitution des tissus altérés.

Enfin, une action secondaire, mais non négligeable de l'iode, est due à ses propriétés décolorantes. Cette action

avait déjà été démontrée par M. OUBRERIE. Ainsi, une dent, dont l'ivoire est coloré par des débris organiques, reprendra sa teinte normale, après l'application de l'ionophorèse avec l'ion  $I^3$ .

L'action microbicide des ions  $I^3$  introduits dans les tissus dentaires, a été étudiée sur une très large échelle par les auteurs américains :

« L'emploi des composés iodés comme électrolytes, dit M. CRANE (*Dental Cosmos*, 1922), est suivi d'un tel degré d'asepsie, qu'on ne peut obtenir aucune culture positive, soit de la dentine, soit des liquides péri-apexiens ».

L'auteur a l'expérience de près de 300 cultures dont le prélèvement a été fait de 2 à 6 jours après le « traitement électrolytique ».

Le Docteur RHEIN, de New-York, a fait plus de 2.500 cultures ; « peut-être trouvera-t-on, dit-il, une méthode plus pratique et dont l'emploi demandera moins de temps, mais actuellement aucune médication ne peut se comparer à celle-ci ».

Nous avons pensé qu'il était vain de vouloir ajouter quelques expériences bactériologiques à cette étude américaine. La technique est minutieuse, et, d'autre part il est un principe microbiologique qui doit rester présent à l'esprit des expérimentateurs : un examen direct négatif et une culture négative, ne prouvent pas l'absence de microbes ; et le meilleur moyen de contrôle est encore l'inoculation, la meilleure inoculation est celle qui est faite à l'homme lui-même. Pour cela, que nous reste-t-il à faire ? : traiter des dents fortement infectées, les obturer et attendre les résultats, — voilà l'inoculation idéale. S'il reste quelques microbes, ils ne tarderont pas à don-

ner des phénomènes inflammatoires ; si, par contre, nous avons une régression des manifestations cliniques, si nous observons une régénération des tissus altérés, nous aurons alors la preuve la plus évidente de l'efficacité antiseptique des ions.

### III. — Résultats cliniques.

Certains auteurs manifestent quelque scepticisme à l'égard de l'ionothérapie :

« S'il peut être prouvé (M. MOXHAM, dans « Commonwealth Dental Review ») que les ions n'ont une action que sur les bactéries et ne détruisent pas les cellules réparatrices si utiles à l'apex des dents, nous serons satisfaits ; mais malheureusement, personne n'a été capable de le prouver et c'est précisément ce doute qui en fait négliger l'emploi. »

Mais au lieu de se reposer sur le « mol oreiller » de MONTAIGNE, nous pensons, avec MM. DELHERM et LAQUERRIÈRE, « qu'il y a lieu pour chaque ion de rechercher quelle est la technique la meilleure ; les lois de la physique sont formelles, mais leur application à chaque substance médicamenteuse, à chaque région de l'organisme, ne peut être indiquée que par l'expérience ».

Cette expérience clinique a été entreprise par de nombreux auteurs.

M. JOHNSTON a traité avec l'ion I<sup>o</sup> de nombreux cas de canaux purulents ou avec fistules ; et, seulement 8 pour 400 cas ont résisté au premier traitement. Sur ces 8 cas, 3 ont donné des résultats satisfaisants à la

seconde application. Dans les 5 autres cas, les racines communiquaient avec le sinus.

Encouragé par ces résultats, l'auteur a essayé le même traitement sur un abcès péri-apical en pleine évolution aiguë : la dent a été trépanée, traitée et obturée, et les résultats « anxieusement attendus ». Après 7 heures, la douleur avait disparu presque totalement ; le malade a bien dormi cette nuit-là et, le matin suivant, la douleur et la tuméfaction avaient disparu ; une légère sensibilité anormale à la pression demeurait ; mais elle disparaissait 24 heures plus tard.

L'abcès a été enrayé par un seul traitement.

« Depuis, dit l'auteur, j'ai été assez heureux pour rencontrer 9 autres cas absolument identiques et avec des résultats aussi satisfaisants ».

L'exposé de ces résultats cliniques nous a paru tenir du merveilleux, mais déjà notre expérience personnelle a dissipé notre étonnement.

---

## OBSERVATIONS PERSONNELLES

---

### OBSERVATION I.

(Cabinet dentaire de M<sup>me</sup> BERNARD.)

B. R., 40 ans. — Radio 1 A et 1 B.

La consultation a pour objet l'incisive supérieure latérale gauche (avril 1929).

Cette dent a été dévitalisée il y a plusieurs années. Depuis quelques mois est apparue une rougeur de la gencive au niveau de l'apex et de temps en temps une petite tuméfaction douloureuse fait saillie.

A l'heure actuelle : douleur à la pression de l'apex et à la pression coronaire.

Radio 1 A., petite zone périapicale claire bien circonscrite.

Le canal est ouvert et élargi ; plusieurs traitements à l'aide d'antiseptiques divers ne calment pas du tout les phénomènes douloureux (mai 1929).

Le 10 juillet, application ionophorétique d'ions I<sup>3</sup>.

Séance unique :

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 3 minutes.

2 milliampères pendant 4 minutes.

2 milliampères  $\frac{1}{2}$  pendant 5 minutes.

Obuturation du canal avec pâte à l'OZn et cône de gutta.

Nouvel examen de la malade le 13 juillet 1929.

Les phénomènes douloureux ont disparu ainsi que la rougeur.

Examen le 13 novembre. La malade n'a plus eu de crise douloureuse. La rougeur a disparu et il n'y a plus de douleur à la pression et à la percussion.

Radio 1 B, disparition de la zone claire périapicale.

## OBSERVATION II.

(Service de M. le Médecin Commandant ROMÉY.)

Fer..., 21 ans, soldat au 75<sup>me</sup> R. I. (Radios 2 A et B.)

Le malade se présente à la consultation dentaire le 10 juin 1929, en vue d'une extraction avant son départ en manœuvres.

Il s'agit d'une première prémolaire supérieure qui a été cause, à plusieurs reprises depuis quelques mois, d'abcès du sillon gingivo-vestibulaire. Entre les crises, il persiste une douleur à la pression et, depuis 24 heures, le malade présente une nouvelle poussée inflammatoire.

Examen : légère fluxion jugale, une tuméfaction rouge, douloureuse, de la grosseur d'un pois, fait saillie dans le sillon gingivo-vestibulaire gauche au niveau de G 4 qui est légèrement mobile.

La couronne de la dent présente une large carie des faces triturantes et mésiales, qui communique avec une chambre pulpaire fortement infectée ; les canaux sont difficilement accessibles.

Traitement : nettoyage et élargissement mécanique des canaux ; le canal vestibulaire ne peut être sondé au delà de quelques millimètres ; le canal palatin l'est sur environ 1 centimètre.

Une mèche de coton imprégnée d'une solution de Lugol est introduite dans la chambre pulpaire et à l'entrée des canaux. L'électrode négative, constituée par un fil de cuivre, placée à la surface de cette mèche, est maintenue par l'opérateur. L'électrode positive indifférente de 100 centimètres carrés, est fixée sur l'avant-bras gauche.

Première application du courant :

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 3 minutes.

Deuxième application, après avoir renouvelé la mèche de Lugol :

2 milliampères pendant 3 minutes.

Troisième application :

2 milliampères  $\frac{1}{2}$  pendant 3 minutes  $\frac{1}{2}$ .

Pendant l'application, le malade a ressenti une douleur sourde analogue à celle qu'occasionne une pression sur sa dent.

Les canaux sont obturés avec des cônes de gutta imprégnés simplement de Lugol, la cavité coronaire est obturée par une boulette de coton iodé.

Le lendemain, la douleur spontanée a disparu ainsi que la tuméfaction ; il reste une zone rouge sensible à la pression.

Deuxième séance d'ionophorèse :

2 milliampères pendant 4 minutes.

2 milliampères pendant 4 minutes.

2 milliampères  $\frac{1}{2}$  pendant 4 minutes.

Obturation provisoire comme le jour précédent.

Radiographie n° 2 A de la planche II. Petite zone régulière de raréfaction osseuse périapicale, l'élargissement des canaux n'a pas été fait jusqu'à leur extrémité.

Troisième séance, 48 heures après le début :

2 milliampères pendant 4 minutes.

2 milliampères  $\frac{1}{2}$  pendant 5 minutes.

Le malade part brusquement en manœuvre et revient seulement cinq mois après, c'est-à-dire le 12 novembre 1929. Il n'a plus souffert de sa dent, mais l'obturation de la cavité n'ayant été faite qu'avec une boulette de coton, la couronne s'est fracturée au cours de la mastication.

A l'examen : pas de rougeur, pas de douleur à la pression de la région apicale, les canaux sont toujours obturés avec des cônes de gutta.

Radiographie n° 2 B. Recalcification nette du tissu osseux péri-apical.

Cette dent ne présente plus d'intérêt prothétique ; elle est extraite. L'opération a montré qu'il y avait eu consolidation des racines. A l'examen, ces racines ont un aspect normal et ne présentent aucune trace de lésion apicale.

### OBSERVATION III.

(Cabinet de M. BOUCHARD.)

Radio n° 3 A et B.

M. V... Incisive latérale supérieure-droite (D 2).

Ne présente aucun signe clinique permettant de penser à la présence d'une infection péri-apexienne. Synthétique sur la

face mésiale, légère décoloration ; aucune réaction aux agents physiques ni à l'électro-diagnose de la pulpe.

Trépanation ; gangrène pulpo-radulaire totale avec odeur « suis generis ».

1° Traitement préliminaire au formol (aldéhyde formique sursaturé et divers antiseptiques aromatiques). Violentes réactions douloureuses.

2° Traitement secondaire : ionophorèse  $ZCl^2$  puis Lugol (3 séances de 10 minutes à 1 milliampère  $\frac{1}{2}$ ). Régression immédiate des phénomènes douloureux.

3° Obturation du canal avec léger refoulement au delà de l'apex.

Radiographie n° 3 A. Montre une large zone diffuse de décalcification.

Les jours suivants, aucun signe clinique. Guérison apparente.

Après trois mois, une radio montre une régénérescence osseuse confirmée par une radio prise treize mois après. (Radio n° 3 B).

Cette dent n'a jamais plus donné de signes pathologiques.

#### OBSERVATION IV.

(Service de M. le Médecin Commandant ROMEX.)

Radio n° 4 A et B, planche III.

Jo... Léon, soldat au 99<sup>me</sup> R. I., vient à la consultation du 7 juillet 1929, pour extraction de D 2.

Cette dent serait cariée depuis deux ans et demi, époque à laquelle le malade avait eu une violente crise douloureuse qui a cessé après vingt-quatre heures. Depuis cette époque le malade a eu cinq poussées inflammatoires douloureuses avec abcès de la grosseur d'un pois.

Le dernier abcès date de trois mois.

Examen : rougeur nette de la gencive, légère douleur à la pression de l'apex et à la percussion de la dent qui est mobile. La couronne est abrasée sur son bord distal, le canal est fortement infecté.

La radiographie montre une zone étendue de raréfaction osseuse péri-apicale. (Radio n° 4 A.)

PLANCHE II





Traitement : élargissement mécanique du canal très difficile, sa profondeur ne dépasse pas 7 millimètres ; la direction du foret fait penser à un faux canal.

Ionophorèse au Lugol.

Première séance le 8 juillet :

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 4 minutes.

2 milliampères  $\frac{1}{2}$  pendant 4 minutes.

Deuxième séance le 11 juillet :

2 milliampères  $\frac{1}{2}$  pendant 5 minutes.

3 milliampères  $\frac{1}{2}$  pendant 5 minutes.

A la fin de cette séance, le malade n'a plus du tout de douleur à la pression.

Le 12 juillet, la rougeur a disparu ; obturation du canal avec une pâte à l'OZn et cône de gutta, puis obturation de la cavité au ciment.

Le malade revient quatre mois après : en novembre 1929.

Il n'a pas eu d'abcès ni de douleurs.

L'examen est absolument négatif, pas de rougeur ni de douleur à la pression sur l'apex.

Radio n° 4 B. Disparition presque totale de la raréfaction osseuse.

Dans un but esthétique, le malade devant avoir un appareil, la dent est extraite ; elle ne présente aucune lésion apicale. La difficulté opératoire a été une autre preuve de la densification osseuse : la luxation a été très laborieuse.

#### OBSERVATION V.

(Cabinet dentaire de M. BOUCHARD.)

M. V... Radio n° 5 A et B.

Racine de (d 5) infectée, montrant à l'examen radiographique une large zone d'ostéite raréfiante (radio n° 5 A) ; fistule gingivale ; mauvais état général du malade ayant contracté en Orient, en même temps que du paludisme, une dysenterie amibienne. Cela conduit à un pronostic réservé ; mais, sur l'insistance du malade, un traitement est entrepris. (Une sonde montre le cathétérisme correct du canal.)

Stérisation du canal par ionophorèse au Lugol et au chlorure de zinc à 5 % (4 séances).

Obturation immédiate du canal.

Aucune suite opératoire.

Après trois ans et demi, le malade revient pour un examen prophylactique. Une radio prise à ce moment (n° 5 B) permet de constater une densification osseuse péri-apicale.

## OBSERVATION VI.

(Service de M. le Médecin Commandant ROMÉY.)

Go... Louis, soldat au 99<sup>me</sup> R. I. Radio 6 A et 6 B.

Vient à la consultation, le 8 juillet 1929, en vue d'extraction.

Il y a un an environ, le malade a eu un traumatisme direct sur son incisive supérieure droite, qui a occasionné une fracture coronaire mettant la pulpe à nu. Après une violente crise douloureuse, le malade a eu des phénomènes inflammatoires au niveau de l'apex et, à trois reprises, il a eu un abcès très douloureux qui guérissait spontanément après trois jours.

Examen : la couronne de D 1 est fracturée, le canal est infecté; réaction rouge à l'apex, très légère douleur à la pression.

Traitement : élargissement du canal jusqu'à l'apex.

Première séance d'ionophorèse d'ions I<sup>3</sup> :

1 milliampère pendant 3 minutes,

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 4 minutes.

2 milliampères pendant 4 minutes.

Le malade a eu le lendemain une réaction douloureuse à l'apex, probablement due au traumatisme apexien lors de l'élargissement du canal.

Le 11, légère tuméfaction rouge douloureuse au niveau de l'apex.

Deuxième séance d'ionophorèse :

2 milliampères pendant 6 minutes,

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 7 minutes.

2 milliampères pendant 5 minutes.

Le 12, la douleur spontanée a disparu, plus de tuméfaction, plus de douleur provoquée.

Troisième séance d'ionophorèse :

2 milliampères pendant 5 minutes.

2 milliampères pendant 5 minutes.

3 milliampères pendant 4 minutes.

Le 16 juillet 1929, disparition de tous les signes subjectifs et objectifs.

Obturation du canal avec une pâte à l'O Zn et un cône de gutta qui a refoulé un peu de pâte au delà de l'apex.

Radio n° 6 A. Rarefaction osseuse péri-apicale, surtout du côté distal, au milieu de laquelle se trouve un peu de pâte obturatrice.

Après quatre mois, le malade est revu le 14 novembre, il n'a plus souffert de sa dent depuis l'époque du traitement. L'examen est négatif, plus de rougeur, plus de douleur provoquée.

Radio : régénération osseuse péri-apicale très nette, léger déplacement de la pâte obturatrice. N° 6 B.

## OBSERVATION VII

(Service de M. le Médecin Commandant ROMÉY.)

Sou... Jean, soldat.

A présenté, il y a trois mois, un abcès très douloureux au niveau de G 1, avec gros œdème de la lèvre supérieure. Guérison spontanée en trois jours. Il y a huit jours, nouvel abcès mais moins grave.

Examen : légère tuméfaction apicale rouge et douloureuse à la pression, sensibilité anormale de la dent à la percussion et au froid.

Le 27 juin 1929, première séance d'ionophorèse :

2 milliampères pendant 5 minutes.

2 milliampères pendant 5 minutes.

Le 28 juin 1929, la rougeur a disparu, mais une très légère tuméfaction sensible persiste, ainsi qu'un peu de sensibilité au froid.

Le 11 juillet 1929, tous les signes cliniques ont disparu.

Deuxième séance d'ionophorèse :

3 milliampères pendant 5 minutes.

3 milliampères pendant 5 minutes.

Radio : aucune altération apparente du tissu osseux.

Obturation du canal avec une pâte à O Zn et cône de gutta ; obturation de la cavité au ciment.

Le malade est revu en novembre, il n'a plus souffert de sa dent qui ne présente aucun signe clinique ni radiologique.

### OBSERVATION VIII

(Service de M. le Médecin Commandant ROMÉY.)

D..., élève à l'Ecole du Service de Santé militaire.

Avant de partir en vacances, désirerait se faire extraire sa deuxième prémolaire supérieure gauche.

La couronne de cette dent s'est fracturée il y a environ six mois ; le lendemain de l'accident, phénomènes de pulpite puis disparition des douleurs.

Un premier abcès apparaît quinze jours après avec grosse fluxion, il y a une évacuation spontanée de pus précédée de violentes douleurs irradiées à tout l'hémiface gauche.

A partir de cette époque et d'une façon périodique (tous les huit jours environ) apparaît une petite tuméfaction qui disparaît par expression du pus qu'elle contient.

Examen : gencive rouge, tuméfiée, douloureuse à la pression.

Le 9 juillet 1929, traitement : ouverture et élargissement des canaux qui ne sont que partiellement sondables.

Première séance d'ionophorèse, ion I<sup>3</sup> :

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 3 minutes.

2 milliampères pendant 4 minutes.

Obturation des canaux avec cônes de gutta iodée.

Dans la même journée, grosse évacuation de pus, puis la douleur disparaît pour ne plus jamais revenir.

Le 13 juillet 1929, disparition complète de la douleur provoquée, de la tumeur et de la rougeur.

Radio : ne donne rien de bien précis, peut-être très légères zones de raréfaction péri-apicale et le long du bord distal.

Deuxième séance d'ionophorèse :

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 4 minutes.

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 4 minutes.

2 milliampères pendant 4 minutes.

Obturation définitive des canaux avec des cônes de gutta iodés et reconstitution partielle avec de l'amalgame au cuivre.

Après quatre mois, le 14 novembre 1929, notre camarade est revu, il n'a présenté aucun phénomène douloureux et n'a plus eu de manifestations cliniques.

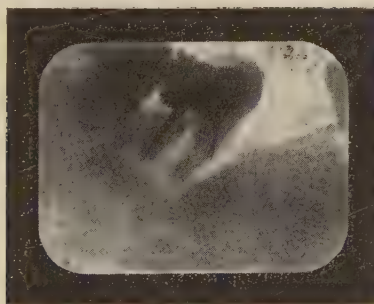
A l'examen, plus de rougeur et pas de douleur à la pression, une couronne sera faite sur cette dent.

Radio : comme celle du mois de juillet, ne donne rien de bien précis, peut-être légère densification osseuse.

#### OBSERVATION IX.

(Laboratoire de physique médicale et cabinet dentaire  
de M<sup>mo</sup> BERNARD.)

Radiographie ci-après.



Pièce anatomo-pathologique n° 9 de la planche en couleurs.

S'étant intéressé à nos expériences de laboratoire, M. B... nous demande d'essayer un traitement par ionophorèse sur

sa deuxième grosse molaire inférieure gauche, qui a des abcès de façon continue et qui a pourtant été soignée à plusieurs reprises.

Examen : tuméfaction bilobée du sillon gingivo-jugal rouge et douloureuse, petite tuméfaction de la gencive sur sa face lingale ; mobilité anormale de la dent, l'amplitude du déplacement au niveau des cuspides est d'environ 2 millimètres.

Une première radiographie permet de constater une intense raréfaction osseuse.

L'amalgame à l'argent, qui obturait imparfaitement la cavité, est enlevé. Le sondage du canal postérieur est facile, légère odeur putride. Le canal antérieur est apparemment accessible mais sa direction paraît anormale. Des cônes de gutta imprégnés d'iode sont placés dans les « canaux ».

Deuxième radiographie qui permet de constater : 1° des foyers péri-apexiens ; 2° la présence d'un faux canal dans la racine antérieure, et 3°, autour de l'orifice de ce faux canal, une large zone de décalcification avec quelques proéminences de travées osseuses.

Malgré cet état pathologique, nous avons tenté la thérapeutique suivante avant de pratiquer l'extraction :

Des mèches de coton imprégnées de Lugol sont introduites à l'entrée des canaux ; une boulette de coton également iodée est placée dans la cavité limitée en avant et sur les côtés par les parois coronnaires et en arrière par une paroi en gutta.

Première application de l'ionophorèse :

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 3 minutes.

2 milliampères pendant 3 minutes.

3 milliampères  $\frac{1}{2}$  pendant 3 minutes.

Pendant l'application, le malade a ressenti une légère douleur sourde surtout au début. Avec l'intensité de plus de 3 milliampères, la douleur s'irradiait vers l'angle du maxillaire.

Aussitôt après, sensation de bien-être, la dent ne présente presque plus de douleur à la pression. Cavité obturée à la gutta.

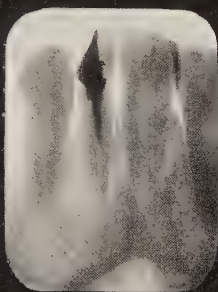
Après seize heures, les tuméfactions gingivales ont diminué de grosseur et sont moins sensibles.

Après vingt-quatre heures, l'amélioration s'est encore accrue.

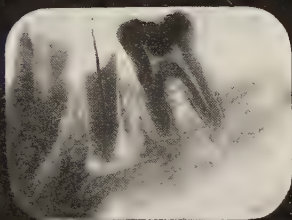
PLANCHE III



4.A



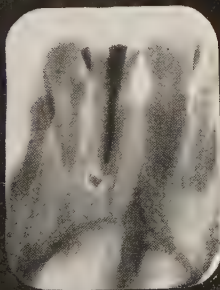
4.B



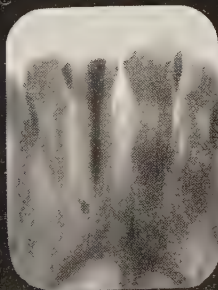
5.A



5.B



6.A



6.B



Nouvelle application de l'ionophorèse, mais seulement, cette fois, à l'entrée du canal antérieur ; le canal postérieur est demeuré obturé à la gutta.

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 3 minutes.

2 milliampères pendant 3 minutes.

2 milliampères pendant 4 minutes.

L'amélioration se poursuit, en trois jours les tuméfactions ont totalement disparu, la dent n'est plus sensible à la pression, ni à la percussion.

Une troisième séance d'ionophorèse est appliquée et seulement dans le canal antérieur :

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 4 minutes.

2 milliampères pendant 6 minutes.

Le canal postérieur est alors obturé avec une pâte au formol et c'est alors que commence le « désastre » :

Au bout de vingt-quatre heures, une petite tuméfaction réapparaît mais plus en arrière cette fois, la dent redevient douloureuse et n'est pas calmée par l'ionophorèse dans la racine antérieure :

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 4 minutes.

2 milliampères pendant 4 minutes.

2 milliampères pendant 3 minutes.

La dent est alors extraite vingt-quatre heures après cette dernière séance d'ionophorèse.

Examen de la plaie : l'alvéole postérieure est enflammée et très sensible, l'alvéole antérieure, au contraire, a un aspect plus louable et est indolore.

Examen de la dent (photo n° 9 de la planche en couleurs) : la racine postérieure est très rouge et présente des débris organiques de l'alvéole ; la racine antérieure contraste étrangement par sa blancheur et ne présente aucune lésion.

La blancheur de la racine antérieure doit surtout être attribuée à l'action décolorante de l'iode.

De cette observation nous concluons que :

1° Le formol a été incapable de stériliser la racine postérieure dont le canal était facilement sondable, la médication a même provoqué une irritation et le réveil d'un abcès latent.

2° La racine antérieure, qui avait un faux canal et un canal

naturel insondable, qui présentait des lésions péri-apicales beaucoup plus graves, en relation avec des poches abcédaires, a été efficacement traitée par l'ion  $I^{3-}$ .

### OBSERVATION X.

(Laboratoire de physique médicale de la Faculté.)

Bo... Depuis plusieurs années ce malade présente une fistule intermittente au niveau de son incisive centrale supérieure droite. Cette fistule a résisté à toute tentative de traitement.

Examen en juillet 1929 : rougeur apicale avec douleur à la pression et à la percussion, orifice fistulaire humide.

Radio : aucun signe radiographique.

Traitement, première séance d'ionophorèse au Lugol :

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 3 minutes.

2 milliampères en 3 minutes.

2 milliampères  $\frac{1}{2}$  pendant 4 minutes.

Deuxième séance d'ionophorèse au Lugol avec le pôle + constitué par un fil de cuivre placé à l'entrée du trajet fistulaire.

1 milliampère pendant 4 minutes.

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 4 minutes.

2 milliampères pendant 5 minutes.

Après quelques jours, la douleur avait disparu ainsi que la trace de la fistule.

En novembre 1929, le malade n'a plus eu de phénomènes inflammatoires et la fistule n'a pas reparu ; plus de douleur à la percussion, peut-être une légère hypersensibilité à la pression forte au niveau de l'apex, due probablement à un refoulement de la pâte obturatrice au delà de l'apex comme l'a montrée la radiographie.

En décembre, plus d'hypersensibilité.

## OBSERVATION XI.

(Service de M. le Médecin Commandant ROMÉY.)

Mag... Eugène, soldat au 99<sup>me</sup> R. I.

Se présente à la consultation dentaire, le 5 juillet 1929, pour extractions diverses ; a souvent souffert des dents, ne peut rien préciser.

Il présente une fistule au niveau de son incisive latérale droite avec rougeur de toute la gencive et douleur exquise au niveau de l'apex de D 2.

La radiographie montre une zone péri-apicale de raréfaction osseuse, le canal est élargi sur les trois quarts de sa longueur.

Le 5 juillet 1929, première séance d'ionophorèse au Lugol :

1 milliampère  $\frac{1}{2}$  pendant 3 minutes.

2 milliampères pendant 4 minutes.

3 milliampères pendant 5 minutes.

Le 6 juillet 1929, deuxième séance :

2 milliampères pendant 4 minutes.

2 milliampères pendant 5 minutes.

Le 9 juillet 1929, la douleur à la pression a totalement disparu, sauf au niveau de la fistule qui paraît persister.

Troisième séance d'ionophorèse avec, dans le canal, une solution de Lugol et le pôle — et à l'orifice de la fistule l'électrode + constituée par un fil de cuivre (ionophorèse au cuivre) ; dans le but de faire pénétrer des ions  $I^3$  vers la zone péri-apicale et dans la fistule des ions Cu pour sa cicatrisation : 1 milliampère.

Le 10 juillet 1929, la fistule excrète un liquide jaune verdâtre et la rougeur et la douleur à ce niveau ont disparu.

Le 16 juillet 1929, aucune manifestation pathologique n'est constatée et le trajet fistulaire est fermé et indolore.

En novembre, le malade est revu, mais il doit partir avant qu'on ait le temps de prendre une radiographie. Ce malade n'a plus jamais souffert de sa dent. Il n'y a plus trace de fistule.

## OBSERVATION XII.

(Service de M. le Médecin Commandant Romey).

Mont..., soldat.

Incisive centrale supérieure droite. A été cause de phénomènes inflammatoires depuis plus d'un an ; présente en juin 1929 un gros abcès apical douloureux à la pression, la dent est mobile et douloureuse.

Destinée à l'extraction, cette dent est auparavant traitée au formol qui n'a fait qu'exacerber les phénomènes douloureux.

Ionophorèse iodée.

Deux séances de 15 minutes à une intensité moyenne de 2 milliampères.

La dent est obturée ; en 24 heures, les phénomènes inflammatoires ont disparu presque totalement.

Le malade part en manœuvre, puis est libéré.

Nous n'avons pu le revoir, mais nous venons d'avoir de ses nouvelles : il n'a plus jamais eu de douleurs ni d'abcès et veut se faire poser une couronne (décembre 1929).

Une radiographie sera prise et publiée ultérieurement.

\*  
\* \*

Il est difficile de dégager, de ces observations, les indications précises de l'ionophorèse. Il serait vain de vouloir en faire un procédé omnipotent.

Cependant, nous proposons l'emploi de l'ionothérapie iodée à la place de tous les dérivés formolés actuellement en usage ; on évitera ainsi les irritations et les lésions médicamenteuses ; bien plus, l'ionothérapie amènera la résolution de ces lésions péri-apicales.

Lorsqu'une lésion est radiologiquement diffuse, l'efficacité de l'ionothérapie est probablement plus grande que lorsque cette lésion a un aspect circonscrit, signe de lésion organisée. Lorsque cette néoformation sera éten-

due, elle restera peut-être l'apanage de la résection apicale.

Mais nous ne posons cette probabilité qu'à titre provisoire, en attendant la confirmation de l'avenir, car déjà les résultats sont tous en faveur de l'ionophorèse.

Il y a enfin les indications préventives, aux résultats moins frappants mais réels. Comme nous l'avons déjà dit, avec l'ion zinc nous préviendrons le réveil d'infections latentes ou secondaires au niveau des canaux si fréquemment inaccessibles.

\*  
\*\*

La contribution que nous avons apportée à l'étude clinique de l'ionothérapie est imparfaite parce que trop récente ; cependant les résultats de nos prédécesseurs et ceux que nous avons obtenus, nous encouragent à poursuivre cette œuvre au delà de nos travaux actuels.

Mais d'ores et déjà, nous serons satisfaits, si nous avons pu démontrer que l'appréciation de la valeur de l'ionophorèse n'est pas seulement une « question de simple opinion », comme disent certains auteurs américains, mais une question vraiment scientifique et d'un intérêt pratique incontestable.

C'est là l'unique prétention de nos efforts.

---



## CONCLUSIONS

---

I. — Les divers procédés mécaniques, chimiques ou physiques de pénétration médicamenteuse dans les tissus dentaires sont imparfaits : 1° ils ne peuvent être ni mesurés ni contrôlés ; 2° ils sont inefficaces ou bien occasionnent des lésions périapexiennes.

Les courants alternatifs de haute fréquence ne donnent lieu, au moins dans les tissus dentaires, à aucun phénomène d'électro-osmose.

II. — Nous avons donné le nom d' « Ionophorèse » au phénomène de migration et pénétration ionique pour le distinguer d'une part, des phénomènes de transports secondaires (électro-osmose et électrophorèse), et d'autre part, des phénomènes d'électrolyse polaire et interpolaire.

III. — Les données de la physique moderne sur la constitution de la matière nous permettent d'avoir des notions précises : 1° sur la nature et les propriétés des ions ; 2° sur la nature du courant électrique.

IV. — Dans les électrolytes, le passage de l'électricité est caractérisé par un double courant d'ions ; aussi le phénomène de migration des ions n'est-il pas une manifestation secondaire et aléatoire du passage du courant. L'ionophorèse est non contingente : son existence est une nécessité.

V. — La technique de l'ionophorèse est facilitée par l'emploi d'un système redresseur de courant alternatif

spécialement adapté à cette fin. Grâce à une combinaison particulière, l'appareil que nous présentons permet d'avoir un courant à progression rigoureusement continue et faiblement ondulé, ce qui accroît la tolérance du patient.

VI. — Tandis que la pénétration des ions est très faible à travers l'épiderme, elle est au contraire considérable dans les tissus dentaires. La vérification expérimentale, faite *in vitro* et *in vivo*, permet de constater : une pénétration primitive et essentielle dans tous les canaux radiculaires, quels que soient leur nombre, leur morphologie et leur état pathologique ; une pénétration secondaire dans les canalicules dentinaires et dans les zones péri-apicales

VII. — L'expérimentation clinique à l'aide des ions  $I^3$  des solutions iodo-iodurées, faite dans des cas de canaux infectés et d'abcès péri-apicaux, montre que l'on peut obtenir des résultats immédiats et durables : cessation des douleurs, disparition des phénomènes inflammatoires, cicatrisation des fistules et régénération du tissu osseux.

*Le Président de la thèse,*  
J. CLUZET.

VU :  
*Le Doyen,*  
JEAN LÉPINE.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :  
Lyon, le 23 novembre 1929

*Le Recteur,*  
*Président du Conseil de l'Université,*  
JOSEPH GHEUSI.

## BIBLIOGRAPHIE

---

### I.

- EDISON. — Ions Electrons et Corpuscules.
- RICHARDSON. — The electron theory of Matter. *Cambridge University Press*.
- R. FERRIER. — Comment aborder le problème de la matière. Blanchard, 1928.
- R. FERRIER. — Les nouveaux axiomes de l'électronique. Blanchard, 1925.
- MAX BORN. — La constitution de la matière, trad. Bellemot, 1922. Blanchard, 1922.
- E. BAUER. — La théorie de Bohr, la constitution de l'atome et la classification des éléments. Hermann, 1922.
- NORMAN R. CAMPBELL. — La structure de l'atome ; la théorie électrique moderne. Hermann, 1925.
- P. BRICOURT. — Ondes et électrons. A Colin, 1929.
- P. BRICOURT. — La résonance atomique. Blanchard, 1927.
- H. MOGER. — La genèse des atomes. Blanchard, 1925.
- A. SOMMERFELD. — La constitution de l'atome et les raies spectrales, trad. Bellemot. Blanchard, 1924.
- R. A. MILLIKAN. — L'électron, trad. Lepape. Alcan, 1926.
- MARCEL BOLL. — Matière, électricité, radiations. Delagrave, 1929.
- M. BOLL. — L'électron et les phénomènes chimiques. Hermann.
- M. BOLL. — L'évolution photochimique des électrolytes.
- J. J. THOMSON. — L'électron en chimie (conférences à l'Institut de Philadelphie, 1923. Blanchard.
- W. KOSSEL. — Les forces de valences et les spectres de Röntgen, trad. M. Golay. Blanchard, 1922.

G. MANGUIN. — La structure des cristaux, 1924.

Eugène BLOCH. — Les phénomènes thermioniques. Blanchard.

Léon BLOCH. — Ionisation et résonnance des gaz et des vapeurs.

Jean PERRIN. — Les atomes. Alcan.

MACRIN. — Les états physiques de la matière. Alcan.

HOLLARD. — La théorie des ions et l'électrolyse. Gauthier-Villars.

M. VEZES. — Leçons de chimie physique. Vuibert, 1929.

OSTWALD. — L'évolution de l'électrochimie. Alcan.

M. WIETHAM. — Sur la vitesse des ions. *Philosophical transaction*, 1895, p. 507.

M. STEELE. — Mesure de la vitesse des ions en solution aqueuse. Existence d'ions complexes. *Phil. transac.*, 1902.

P. DÉTOIT et G. BAUME. — L'hydratation des ions. *Journ. de Ch. phys.*, 1909.

M. CHANOT. — Recherches expérimentales sur les contacts liquides. Thèse Doct. ès sciences, Lyon, 1906.

M. CHANOT. — Contribution à l'étude de la polarisation des tissus. *Annales d'Electrologie et de Radiologie*, 3 mémoires, 1908, 1909, 1910.

M. CHANOT. — Sur le cloisonnement des chaînes liquides. *C. R. Soc. Biol. Lyon*, présent. M. Cluzet, 12 juill. 1926.

M. CHANOT. — De l'action électrogène des membranes. *C. R. Soc. de Biologie de Lyon*, présent. M. Cluzet, 12 juillet 1926.

M. CHANOT. — Electrolyse des dissol. de  $(SO^4Cu)$  cloisonnées par une membrane animale. *C. R. S. B. Lyon*, 19 décembre 1927.

M. CHANOT. — Résistance électrique des diaphragmes cloisonnant les chaînes liquides traversées par le courant continu. *C. R. Soc. Biol. Lyon*, 9 juillet 1928.

M. DOUMER. — Vitesse de transport des ions H. Cl et OH. *C. R. Acad. Sciences*, t. 146, p. 894.

M. DOUMER. — Théorie des ions. *Annales d'électrobiologie*, 1907.

E. DARMOIS. — Leçons sur la conductibilité des électrolytes, professées en Sorbonne, 1927-1928. Vuibert, 1929.

J. PONSINET. — Principes de l'électrochimie. A. Colin, 1927.

## II

LABATUT. — Transport des ions dans les tissus organisés. *Dauphiné Médical*, 1893.

E. DESTOT. — De la cataphorèse électrique : ses applications thérapeutiques. *Lyon Médical*, 1894.

FOVEAU DE COURMELLES. — Osmose et biélectrolyse. Congrès A. F. A. S., Boulogne, 1899.

S. LEDUC. — Introduction électrolytique des ions dans les tissus vivants. Congrès A. F. A. S., Paris, 1900.

BORDIER. — Confirmation de la théorie de transport des ions à travers les tissus. C. A. F. A. S., Paris, 1900.

S. LEDUC. — La théorie des ions en médecine. *Annales d'Electrobiologie*, mars-avril 1901.

FRANKENHAÜSER. — Thérapeutique électrochimique. *Revue de Thérapeutique*, sept. 1901.

GONZALEZ QUIJANO-SANCHEZ. — La théorie des ions en électricité médicale. Thèse, Paris, 1902.

LEWIS JONES. — Etude sur l'emploi des ions en thérapeutique, trad. *Arch. El. Med.*, 1905.

BORDIER et ROUCH. — Expériences sur les phénomènes d'entraînement et le transport des ions par l'électricité statique. Congrès A. F. A. S., Cherbourg, 1905.

LOEB. — Etude des ions. *Rev. gén. des Sciences*, 1906.

TUFFIER et MANTÉ. — A propos des médications ioniques. *Soc. de Biol.*, janvier 1907.

SOURDEAU. — Thèse, Montpellier, 1909.

LEWIS JONES. — Ionic medication, 1913.

FRANKENHAÜSER. — Iontophorèse, trad. *Arch. Electr. Méd.*, 1913.

PADOVANI. — Thèse, Montpellier, 1910.

L. JONES. — The principles of ionic medication. *Arch. Elect. Med.*, 1910.

- Mendel BRUKER. — Thèse, Paris, 1917.
- FOVEAU DE COURMELLES. — Précis d'électro-radiologie. Doin, 1917.
- GUILLEMINOT. — Electrologie et Radiologie. Masson, 1922.
- A. STROHL. — L'introduction médicamenteuse par l'électrolyse. *Paris Médical*, 1923.
- LAQUERRIÈRE. — Que reste-t-il de l'ancienne conception de la cataphorèse ? *Soc. Fr. d'Electrothérapie*, 1924.
- DELHERM et LAQUERRIÈRE. — Ionothérapie profonde. *J. de Rad. et Electrol.*, 1925, p. 53.
- NOGIER. — Electrothérapie.
- A. R. FRIEL. — Electrolytic ionisation. Bristol, 1922.
- ZIMMERN. — Eléments d'électrothérapie clinique. Action hydratante de l'ion Na et cataphorèse. *Soc. de Biol.*, 1927.
- ZIMMERN. — Hydratation des ions en électrologie. *Bul. de l'Acad. de Méd.*, 1928.
- BOURGUIGNON. — L'électrothérapie. Maloine, 1925.
- CLUZET. — Précis de physique médicale, p. 542.
- DELHERM et LAQUERRIÈRE. — Ionothérapie électrique. Paris, 1925.
- GIDON. — Ionothérapie électrique. *An. Labo. Clin.*, 1928.
- DUHEM. — L'ionisation, 1929 (non encore paru).

### III

- A. PONT. — La cataphorèse en art dentaire. Thèse Lyon, 1899.
- OGAWA. — The use of kataphoresis for pulp mumific. *Shigakn Kensan*, 1900-1901, p. 33.
- Henry W. GILLET. — Cataphoresis. *Dent. Cos.*, 1900, 860.
- Paul VOIGT. — Considération of Cataphoresis. *Dent. Cos.*, 1900, 647.
- A. PONT. — Cataphoresis in Dentistry. 3<sup>me</sup> Congrès dentaire international, 1900. *Dent. Cos.*
- MILLER. — On electric sterilisation of root canals. *Tr. Odont. soc. Gr. Brit.*, 1903-1904, 150.

- ZIERLER. — Electro-steril. in der Zahnheilkunde. *Schweiz. Wrthyscher. f. Zahn*, 1905, p. 22.
- MILLER. — On electric sterilisation of root canals. *Tr. Odont. Soc. Gr. Brit.*, 1903-1904, 150.
- FOVEAU DE COURMELLES. — Electrothérapie dentaire. Paris, 1904.
- ZIERLER. — Elektrosterilisation in der Zahnheilkunde. *Schweiz. Wrthyscher. f. Zahn*, 1905, p. 22.
- MENDEL Joseph. — L'ion cocaïne et l'ion zine en thérapeutique dentaire. Thèse Paris, 1908.
- S. FRIED. — Vorführung eines Elektrodenfixators behufs leichter Ausführung der Elektrosterilisation.
- GASSMANN. — Zur Therapie der Alveolarpyorrhoe. *Zahnärztl. Rdsch*, n° 51, 1911.
- A. JOACHIM. — The application of electro-chemistry in dentistry. *Dent. Cos.*, 1911, 838.
- M. L. RHEIN. — Scientific Treatment of Root-canals electrolysis, p. 999. *Dent. Cos.*, 1911.
- LOUIS. — Medikamentöse... mit der sterilisation durch schwache galvanische Ströme. *Correspbl. f. Zahnärzte*, n° 2, 1912.
- RUTTLOFF. — Elektrophorese. *D. Zahnärztl. Ztg.*, n° 7, 1912.
- WORMALD R. M. — Ionic medication. *British Dental Journal*, 1913, 362-364.
- LEIX. — Electrotherapie in der Zahnheilkunde. *Zahnärztl. Mitt.*, n° 3, 1913.
- R. F. READING. — Vaccine or Ionization in Pyorrhea. *Commonwealth. Dent. Rev.*, 1913.
- Val MACDODALD. — A new method of treating empyema of the antrum, electric current, p. 501. *Dent. Cos.*, 1913.
- FRASER R. M. — Ionic medication. *Odontochirurgical Soc. Scotland Trans*, 41-45, 1914.
- NEUMANN Edgar. — Ion therapy in Dentistry. *Dent Cos.* 1914, 1281-1282.
- George T. FETTE. — Ionization. *Dent. Cos.*, 1914.
- J. POLACK. — Ionic medication. *Australian Jnl. Dentistry*. 1915, 245-253.

- ASCH, ANDREW. — The practical Application of Ionization and Cataphoresis. *New Jersey Dent. Jnl.*, IV, 1915.
- D. Frank PRICE. — Ionization. Method of Treating Alveolar Abscess. *Dental Surgery*, 1916, 501-503.
- MARCUS STRANSSBERG. — Successful Treatment of Apical Abscess by Ionization, 259. *Dental Items of Interest*, 1916.
- HERDLING A. C. M. — Ionization. *New Jersey Dent. Jnl.*, 254, 1916.
- E. STURRIDGE. — Ionic Medication. *Common Wealth Dental Review*, 1917, 372-375.
- E. STURRIDGE. — Ionic Medication with special Reference to the Treatment of Granuloma and pyorrhea. *New-York Medical Journal*, march 1917; *Allied Journal*, 1917, 49-58.
- E. STURRIDGE. — The Electro-therapeutic Action of certain Ions. *Dent. Cos. ang.*, 1917.
- Herrmann PRINZ. — Electro sterilisation of Root-canals. *Dent. Cos. apr.*, 1917.
- George T. FETTE. — The present Standing of Electrolytic Medication, with a Discussion of a few Basal principles Therein Applied. *Dent. Cos.*, march 1917.
- Val MACDONALD. — Ionization in pyorrhea. *Dent. Cos.*, 1917.
- J. CHIFFORD. — New Instruments for Ionization. *Cosmos*, 1125, 1917.
- G. T. FETTE. — Electrolytic Medication. *Dental Summary*, 1918, 788-799.
- E. L. CUSTER. — A method for electrosterilisation and for root filling with zinc chlorid and a metallic zinc cone. *Dental Summary*, 1918, 399-404.
- G. J. PELL. — The Treatment of root canals and apical infections. *American Dentist.*, 1918.
- PRINZ H. — Über Elektrosterilisation von Wurzelkanälen. *Schweiz. Vrtljschr. f. Zahnhlk.*, s. 240, 1918.
- ZENTLER A. — Electrolytic Therapeusis versus Apicoectomy as an Efficient Method for Prevention and Eradication of Apical Infections. *Allied Journal*, 183, 1918.
- G. J. PELL. — Ionic Medication of Root-canals and Apical Infections. *American Dentist.*, sept. 1918.

- G. T. FETTE. — Electrolytic Medication with special Reference to Ionic Chemistry. *National Dental Am. Jul.*, 1918.
- B. BENBOW. — Ionic Medication. Pyorrhea Alveolaris. *Common wealth Dental Review*, 1919, 103-110.
- L. CUSTER. — Electro-sterilisation of Root-Canals. *Dental Digest.*, XXV, 116, 1919.
- N. F. CROZIER. — Ionization of septic pockets at the apices of teeth. *Commonwealth Dent. Rew.*, 1920, 49-55-64-66.
- P. B. WRIGHT. — The Treatment of Pulpless Teeth electrolytic medication, p. 868. *Dent. Cos.*, 1920.
- A. A. NOUEL (Venezuela). — Electric modalities for the treatment of Pyorrhea Alveolaris. *Dent. Cos.*, 1920, 972.
- Arthur B. CRANE. — A practicable Root-canal Technique Ionization, p. 338, 340, 341. *Dent. Cos.*, 1920.
- Bertram B. MACHAT. — The significance of Pulpless Teeth. in Health and Disease. Ionization, p. 368. *Dent. Cos.*, 1920.
- E. STURRIDGE. — Periodontal disease and its treatment by ionic medication. *Kimpton London*, 1920.
- GUEBEL. — Congrès de l'A. F. A. S., Strasbourg, 1920.
- John A. MARSHALL. — Sterilisation of infected Dentin. *Pacific Dental Gazette*, XXIX, 1921, 545-556.
- P. BEYSSAC. — Traitement des canaux radiculaires. L'ionisation, p. 99. *Province Dentaire*, avril 1921.
- HARVEY. — Methodes of sterilisation in dentistry. *U. S. Navy. M. Bull.*, 1921, 283.
- BRITISH JNL. DENTAL SCIENCE. — The discovery of Ionization, 1921, LXIV.
- FRASER R. M. — Ionic Medication. *Record Dental*, 1922, 444-448.
- Black NORMANN. — A few general notes on ionization. *British Dent. Journ.*, 1922, 1059-1067.
- JOHNSTON-HARRY B. — Pulp Canal Filing and Ionization Results. *Dent. Cos.*, 1922, 1157.
- E. STURRIDGE. — Ionization in Root canal therapy. *British Dent. Journ.*, 1923, 1420-1422.

- H. B. JOHNSTON. — The positive destruction of Apical infection by Electrolytic Medication. *Summary Dental*, 1923, 743-752.
- Leth ESPENSEN. — Beitrag zur Behandlung von infizierten Wurzelkanälen. *D. Zahnhlk.*, n° 61, 1923.
- TRISCHLER. — Die Elektrophorese in der Zahnheilkunde. Leipzig, 1923.
- Charles J. STOLOFF. — Conservation of Pulpless Teeth by Application of Ionization. *Dent. Cos.*, 1923, 732.
- HARRY B. JOHNSTON. — Pulp Canal opening. Technique and Results of Electrolytic Medication. *Dent. Cos.*, 1923, 577-582.
- A. B. CRANE. — The test of Time in Root-Canal work Electrolytic medication, p. 278. *Dent. Cos.*, 1923.
- D. CAMPBELL. — Ionic Medication. *Surgeon Dental*, 1923, 210.
- M. L. RHEIN. — Ionic Medication. Congrès dent. de Philadelphie. *Dent. Cos.*, 1923.
- E. VAESSEN. — L'ionisation en art dentaire. *Annales Belges de Stomatologie*, vol. 7, 1924.
- R. ODIN. — L'électrothérapie en art dentaire. *Semaine Dentaire*, vol. 6, 1924 ; n° 46, 1180 ; n° 47, 1206.
- GUNNAR SIVEN. — Infekterade rotkanalers sterilisation genom svaga elektriska strömmar. *Odontologisk Lidskrift*, n° 1. S., 37, 1924.
- J. P. BJERREGAARD (Copenhagen). — Elektrosterilisation af inficerede rodkanaler. *Tandlaegebladet*, n° 2, 1925.
- John REIMERS (Hambourg). — Zur Elektrosterilisation infizierter Wurzelkanäle. *Zahnärztl. Rdsch.*, n° 25, 1925.
- GUEBEL. — Traitement des dents par la méthode électrolytique. *L'Odontologie*, 1925, 227.
- LEIX Rudolf. — Elektrotherapie (Electrolyse Iontophorese). *Die Fortschritte der Zahnheilkunde*, 1926, 556-561.
- Erich FEILER. — Wurzelfüllungsmethoden (Elektrosterilisation, 542). *Die Fortschritte der Zahnheilkunde*, 1926.
- M. L. RHEIN. — A prolonged Study of the Electrolytic Treatment of Dental Focal Infection. *Dent. Cos.*, 1926, 971.

E. STURRIDGE. — Electrotherapy in periodontal disease and root-canal sterilization. 7<sup>me</sup> Congrès dentaire international, Philadelphie, 1926.

Charles F. BÖDECKER. — The ionization of septic roots. *Dental Cosmos*, 1927, 1157.

STURRIDGE E. — Electrotherapy in periodontal diseases and root canal sterilization. *J. Ann. Dent. Ass.*, 1927, 1867.

Lester R. CAHN. — Electrolytic Medication. *Dent. Cos.*, 1928, 1211.

L. J. GROSSMANN. — An Electrolyser for Use in Electro-sterilization. *Dent. Cos.*, july 1929.

R. M. WALLS. — Electrolytic medication. *Dent. Mag. and Oral Topics*, vol. 46, n° 3, march 1929.



## TABLE DES MATIÈRES

---

|                    |    |
|--------------------|----|
| INTRODUCTION ..... | 13 |
|--------------------|----|

### CHAPITRE PREMIER.

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| LES PROCÉDÉS DE PÉNÉTRATION EN ODONTOLOGIE ..... | 15 |
|--------------------------------------------------|----|

*Le problème de la pénétration.*

*Les procédés mécaniques.*

*Les procédés chimiques.*

*Les procédés physiques.*

*Les procédés électriques.*

*Terminologie.*

### CHAPITRE II.

|                         |    |
|-------------------------|----|
| LA NATURE DES IONS..... | 23 |
|-------------------------|----|

I. — *L'atomistique moderne.*

II. — *Structure de l'atome.*

III. — *Théories sur les modèles atomiques.*

IV. — *Représentation électronique des atomes et des ions.*

V. — *Les ions dans les cristaux.*

VI. — *La dissociation ionique des électrolytes.*

### CHAPITRE III.

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES IONS..... | 41 |
|------------------------------------------|----|

I. — *Les courants électroniques.*

II. — *Les phénomènes d'électrolyse.*

III. — *Les courants ioniques (Ionophorèse):*

IV. — *Vitesse des ions.*

V. — *Les phénomènes de transports secondaires.*  
*(Electrophorèse, Electro-osmose).*

VI. — *La pénétration des ions.*

CHAPITRE IV.

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| APPAREILLAGE .....                                   | 57 |
| I. — <i>Les sources de courant continu.</i>          |    |
| II. — <i>Les systèmes de réglage.</i>                |    |
| III. — <i>Le redressement du courant alternatif.</i> |    |
| IV. — <i>Le filtrage du courant redressé.</i>        |    |
| V. — <i>La nature du courant filtré, ses effets.</i> |    |
| Résumé.                                              |    |

CHAPITRE V.

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'IONOPHORÈSE..                                                                              | 67 |
| I. — <i>Le mouvement des ions colorés.</i>                                                                          |    |
| II. — <i>Etude spéciale de l'ion <math>I^{3-}</math>. (Expériences personnelles sur l'ion <math>I^{3-}</math>).</i> |    |
| III. — <i>Discussion sur les vérifications expérimentales de la pénétration des ions.</i>                           |    |
| IV. — <i>Procédés physiologiques.</i>                                                                               |    |
| V. — <i>Procédés électrolytiques.</i>                                                                               |    |
| VI. — <i>Procédés chimiques.</i>                                                                                    |    |
| VII. — <i>Procédés des ions colorés.</i>                                                                            |    |
| VIII. — <i>Cas expérimentaux.</i>                                                                                   |    |

CHAPITRE VI.

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| ACTION PHARMACODYNAMIQUE DES IONS.....                        | 89  |
| I. — <i>Propriétés pharmacodynamiques générales des ions.</i> |     |
| II. — <i>Propriétés particulières :</i>                       |     |
| a) <i>Ions métalliques ;</i>                                  |     |
| b) <i>Ions électro-négatifs ;</i>                             |     |
| c) <i>Ion <math>I^3</math>.</i>                               |     |
| III. — <i>Résultats cliniques.</i>                            |     |
| OBSERVATIONS PERSONNELLES.                                    |     |
| CONCLUSIONS .....                                             | 113 |
| BIBLIOGRAPHIE .....                                           | 115 |







